

Diplomová práce

VŠB – Technická univerzita Ostrava

Fakulta strojní

Katedra robototechniky

Návrh kompaktního kloubu manipulační nadstavby

Design of a Compact Joint of a Manipulator Arm

Student:

Bc. Adam Honěk

Vedoucí diplomové práce:

Ing. Milan Mihoła

V Ostravě 23. 5. 2011

Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě

.....

podpis studenta

Prohlašuji, že

- jsem celou diplomovou práci včetně příloh, vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.
- byl jsem seznámen s tím, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. – autorský zákon, zejména §35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a §60 – školní dílo.
- беру на вѣдомі, же Высoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen VŠB-TUO) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě diplomovou práci užít (§35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že jeden výtisk diplomové práce bude uložen v Ústřední knihovně VŠB-TUO k prezenčnímu nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího diplomové práce. Souhlasím s tím, že údaje o diplomové práci, obsažené v Záznamu o závěrečné práci, umístěném v příloze mé diplomové práce, budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- было сжеднано, же с VŠB-TUO, в пріпадѣ зájму з její strany, узаврју лценční сmlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu §12 odst. 4 autorského zákona.
- было сжеднано, же užít své dílo – дипломovou práci nebo poskytnou licenci, k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém пріпадѣ ode mne požadovat прімѣренý пріспѣvek на úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO на vytvoření díla vynaložены (až do jejich skutečné výše).
- беру на вѣдомі, же оdevздáním své práce souhlasím se zveřejněníм své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu на výsledek její обhаjoby.

V Ostravě :

.....

Adam Honěk

Anotace

HONĚK, A.. Ostrava: katedra robototechniky, Fakulta strojní VŠB-Technická univerzita Ostrava, 2011, 59 s. Diplomová práce, vedoucí Mihoła, M.

Diplomová práce se zabývá konstrukčním návrhem kompaktního kloubu manipulační nadstavby. Kompaktní kloub je řešen jako modulární jednotka se dvěma stupni volnosti. V práci jsou navrženy dvě rozměrové verze kloubu. Dále je navržena referenční manipulační nadstavba.

Anglicky

The theme of this thesis is constructional design of a compact joint of a manipulator arm. The compact joint is designed as a modular unit with two degrees of freedom. The thesis contains two size variations of the design of the joint. There is also design of a referential manipulator arm in the thesis.

Poděkování

Děkuji vedoucímu mé diplomové práce ing. Milanu Miholovi, za cenné rady a připomínky poskytované během zpracovávání zadaného tématu.

Obsah diplomové práce

1	Úvod	11
2	Přehled současného stavu dané problematiky	12
2.1	Příklady konstrukce kloubu orientačních ústrojí průmyslových robotů	12
2.2	Příklady rotačních modulů firmy SCHUNK	13
2.2.1	PowerCube PR [9]	13
2.2.2	Rotační moduly PRL [10]	13
2.2.3	Integrovaný modul SPB [11]	14
2.3	Další moduly	15
2.3.1	ANAT-AMI-100 [12]	15
2.3.2	Molecubes FESTO [13]	16
3	Seznam požadavků	17
4	Varianty řešení	17
4.1	Varianta 1	17
4.2	Varianta 2	19
4.3	Varianta 3	20
4.4	Varianta 4	21
5	Hodnotová analýza	23
5.1	Kritéria rozhodování	23
5.2	Zhodnocení kritérií	23
5.3	Stanovení významnosti	24
5.4	Index změny parametru a vážené indexy	25
5.5	Určení vítězné varianty	26
6	Návrh kompaktního kloubu 1	26
6.1	Základní parametry	26
6.2	Popis konstrukce	26

6.2.1	Popis převodů	28
6.2.2	Snímání koncové polohy	30
7	Návrh kompaktního kloubu 2	30
7.1	Základní parametry	30
7.2	Popis konstrukce	31
7.3	Popis převodů.....	31
7.3.1	Snímání koncové polohy	32
8	Návrh referenční manipulační nástavby	1
8.1	Sestava	33
8.2	Komponenty.....	34
9	Návrh pohonů	35
9.1	Návrh převodu.....	35
9.1.1	Základní parametry jednotlivých částí převodovky	36
9.1.2	Převodový poměr	37
9.1.3	Účinnost převodovky	38
9.2	Návrh motorů	44
9.2.1	Určení průběhu rychlosti na krokových motorech	44
9.2.2	Určení průběhu momentů	45
9.3	Použité motory	47
9.3.1	Kloub 1	47
9.3.2	Kloub 2	49
10	Řízení	51
10.1	Kloub 1	51
10.2	Kloub 2.....	52
11	Pevnostní analýzy ramen.....	52
11.1	Rameno 2	53

11.2	Rameno 1	54
12	Závěr.....	55
13	Seznam použité literatury a zdrojů.....	57
14	Seznam příloh.....	59

Seznam užitého značení

značka	význam	jednotka
ζ_1	Ztráty na ozubení – ozubený převod	%
ζ_2	Ztráty na ozubení – 1. stupeň planetové převodovky - centrální/satelit	%
ζ_3	Ztráty na ozubení – 1. stupeň planetové převodovky - satelit/korunové	%
ζ_4	Ztráty na ozubení – 2. stupeň planetové převodovky - centrální/satelit	%
ζ_5	Ztráty na ozubení – 2. stupeň planetové převodovky - satelit/korunové	%
η	Celková účinnost převodu	-
η_1	Účinnost - ozubený převod	-
η_2	Účinnost - 1. stupeň planetové převodovky	-
η_3	Účinnost - 2. stupeň planetové převodovky	-
μ_1	Součinitel tření na ložisku 1	-
μ_2	Součinitel tření na ložisku 2	-
μ_3	Součinitel tření na ložisku 3	-
μ_4	Součinitel tření na ložisku 4	-
μ_5	Součinitel tření na ložisku 5	-
σ	Napětí	MPa
b_1	Vnitřní průměr ložiska	mm
d_1	Vnitřní průměr ložiska	mm
d_3	Průmět příruby ložiska	mm
F	Síla	N
F_a	Axiální síla	N
F_b	Síla na ložisko satelitu	N
F_r	Radiální síla	N
i	Celkový převodový poměr	-
i_1	Převodový poměr ozubeného převodu	-
i_2	Převodový poměr 1. stupně planetové převodovky	-
i_1	Převodový poměr 2. stupně planetové převodovky	-

Návrh kompaktního kloubu

L	Životnost ložiska se zkříženými válečky	ot
$L1$	Ložisko 1	-
$L2$	Ložisko 2	-
$L3$	Ložisko 3	-
$L4$	Ložisko 4	-
$L6$	Ložisko 5	-
l_{r1}	Délka ramene 1	mm
l_{r1}	Délka ramene 2	mm
M_{k1}	Krouticí moment kloubu 1	Nm
M_{k2}	Krouticí moment kloubu 2	Nm
M_T	Celkový třecí moment	Nm
M_{T1}	Třecí moment na ložisku 1	Nm
M_{T2}	Třecí moment na ložisku 2	Nm
M_{T3}	Třecí moment na ložisku 3	Nm
M_{T4}	Třecí moment na ložisku 4	Nm
M_{T5}	Třecí moment na ložisku 5	Nm
n	Otáčky	ot/min
n_{11}	Otáčky centrálního kola 1. stupně planetové převodovky	ot/min
n_{u1}	Otáčky unášeče 1. stupně planetové převodovky	ot/min
n_{12}	Otáčky centrálního kola 2. stupně planetové převodovky	ot/min
n_{u2}	Otáčky unášeče 2. stupně planetové převodovky	ot/min
p_1	Radiální tlak na ložisko 1	Pa
p_2	Radiální tlak na ložisko 2	Pa
p_3	Radiální tlak na ložisko 3	Pa
p_4	Radiální tlak na ložisko 4	Pa
p_5	Radiální tlak na ložisko 5	Pa
P_c	Dynamický ekvivalent radiální síly	KN
t	Čas	s
t_0	Počáteční čas	s
$t_{0,8}$	Doba akcelerace	s

1 Úvod

Servisní robotika postupně proniká do čím dál většího okruhu lidských činností. Servisní roboty se využívají k zastoupení člověka v nebezpečném prostředí, k usnadnění a zkvalitnění práce v průmyslu, zdravotnictví, stavebnictví, nebo zemědělství. V posledních letech se setkáváme se servisními roboty pro využití v domácnosti.

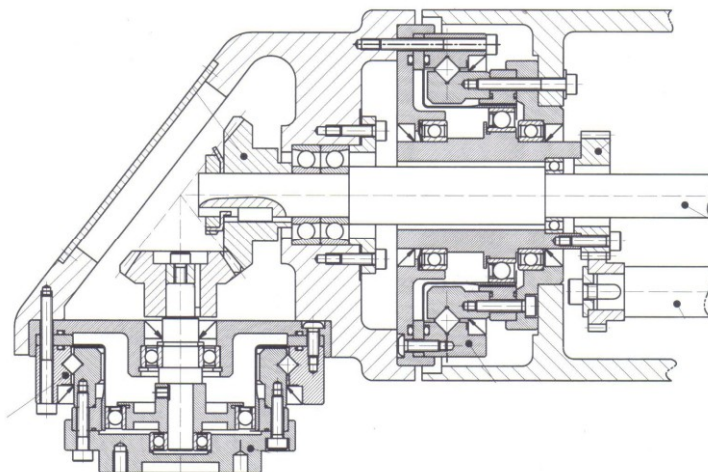
Servisní roboty se skládají ze dvou hlavních částí - subsystému mobility a technologické nadstavby, která vykonává servisní úlohu. Velmi často je to manipulační nadstavba. Manipulační nadstavba se často navrhuje se subsystémem mobility jako celek. Toto řešení je vhodné pro specializaci na určitou danou problematiku. Při univerzálnějším využití je vhodné, aby bylo možné manipulační nadstavbu přizpůsobit dané aplikaci. Tento problém je možné řešit použitím modulární konstrukce manipulační nadstavby.

Tato diplomová práce se zbývá konstrukčním návrhem kompaktního kloubu manipulační nadstavby. Kloub je navržen jako modulární jednotka se dvěma stupni volnosti, kterou je možné za pomoci vhodných nosných prvků sestavovat do různých kinematických struktur.

2 Přehled současného stavu dané problematiky

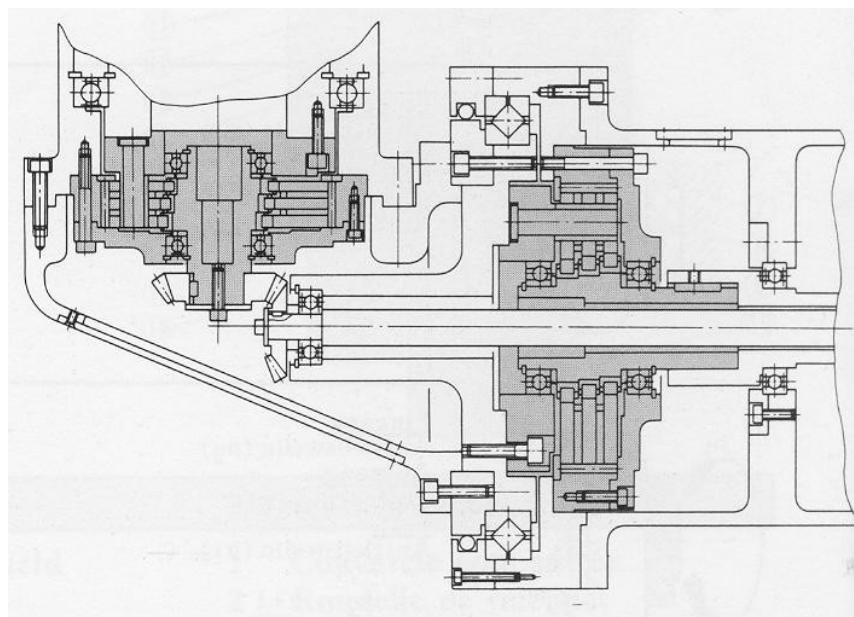
2.1 Příklady konstrukce kloubů orientačních ústrojí průmyslových robotů

Konstrukce orientačního ústrojí se dvěma stupni volnosti s použitím harmonických převodovek.[1]



obr.1 *Orientační ústrojí se dvěma stupni volnosti*

Konstrukce orientačního ústrojí se dvěma stupni volnosti s použitím cyklopřevodovek.
[1]



obr.2 *Orientační ústrojí se dvěma stupni volnosti*

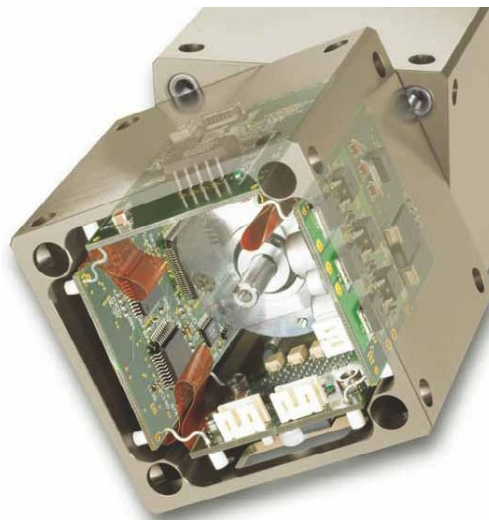
2.2 Příklady rotačních modulů firmy SCHUNK

2.2.1 PowerCube PR [9]

Pohon zajišťuje EC motor a harmonická převodovka. V modulech je integrováno univerzální komunikační rozhraní.

Technické údaje:

- Točivý moment až 372 Nm
- Otočný úhel $> 360^\circ$
- Rychlost až $470^\circ / \text{sec}$.
- Krátké doby cyklu
- Napájení 24 VDC



obr.3 PowerCube PR

2.2.2 Rotační moduly PRL [10]

Pohon zajišťuje EC motor a harmonická převodovka. V modulech je integrována řídicí elektronika. Dále je modul vybaven IRC senzorem pro kontrolu polohy a rychlosti.



obr.4 Rotační moduly PRL

Technické údaje:

- Točivý moment až 239 Nm
- Otočný úhel $> 360^\circ$
- Rychlost až $70^\circ / s$
- Napájení 24 VDC

Funkční řez:

1. Řídicí elektronika
2. Integrovaná brzda
3. Servomotor
4. Harmonická převodovka



obr.5 Funkční řez modulem PRL

2.2.3 Integrovaný modul SPB [11]



obr.6 Integrovaný modul SPB

Funkční řez:

- | | |
|-----------------------|-------------------------------------|
| 1. Řídicí elektronika | 3. Pohon |
| 2. Encoder | 4. Harmonické Drive® zařízení |
| | 5. Brzdy |
| | 6. Dutý hřídel pro interní zapojení |

Technická data:

- | | |
|-----------------------------|-----------|
| • Maximální rychlost | 9.2 m / s |
| • Jmenovitý krouticí moment | 35 Nm |
| • Maximální točivý moment | 64 Nm |
| • Úhel | 340° |
| • Maximální teplota okolí | 40° |

2.3 Další moduly

2.3.1 ANAT-AMI-100 [12]

Moduly mají v sobě integrovaný plně programovatelný servomotor s převodovkou a senzorický subsystém. Může být nakonfigurován až s 32 stupni volnosti.



obr.7 Sestava článku ANAT-AMI



obr.8 Jeden článek ANAT-AMI

2.3.2 *Molecubes FESTO [13]*

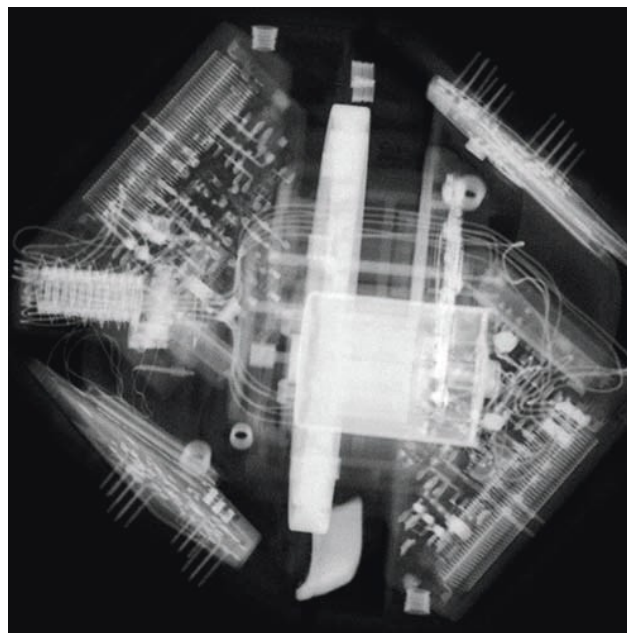


obr.9 *Sestava Molecubes*

Tyto kostky jsou vybaveny počítačovými čipy, mohou být k sobě libovolně připevňovány. Každá Molecube komunikuje se všemi ostatními kostkami. Kostky si mezi sebou přenášejí energii.

Technické údaje:

- Délka hrany Molecube: 66 mm
- Hmotnost: 200 g
- Točivý moment: 4,85 Nm
- Úhel natočení: kontinuální
- Rychlost rotace: max. 17 za minutu
- Procesory: 2 x ATmega16
- Servo řadič: AX-12 s ATmega8
- Interní komunikace: jeden drát, max. 1 Mbps
- Externí komunikace: USB a Bluetooth



obr.10 *Rentgenový snímek Molecubes*

3 Seznam požadavků

Technické parametry	
Počet stupňů volnosti	2 (rotace)
Maximální hmotnost	10kg
Rychlost	40°/s
Rozsah pohybu	330°
Krouticí moment	30Nm
Rozměry skříň (š,v,h)	Max. 200x200x200mm
Rozměry příruba (ΦD,l)	Max. Φ100x65mm
Další požadavky	
Stupně volnosti budou vyvedeny přímo na přírubu pro připojení nosných částí manipulační nadstavby. Příruba bude obsahovat konektor pro připojení silové a řídicí kabeláže.	
Musí být zajištěna bezpečnost pro případ poruchy (brzdy, nebo samosvorný kloub).	
Umístění řízení jednotlivých pohonů přímo v kloubech.	
Klouby budou připojeny na sběrnici.	

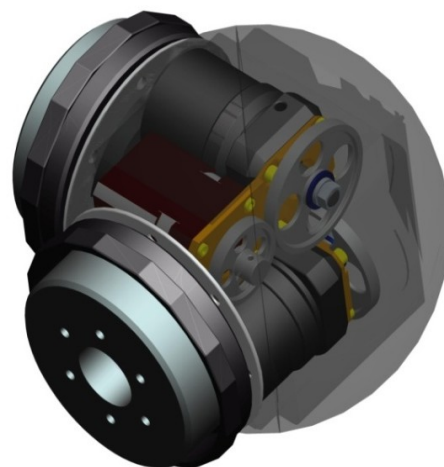
tab.1 Seznam požadavků

4 Varianty řešení

Byly navrženy čtyři varianty řešení. Všechny varianty byly navrženy na stejný krouticí moment a stejnou rychlost polohování dle seznamu požadavků.

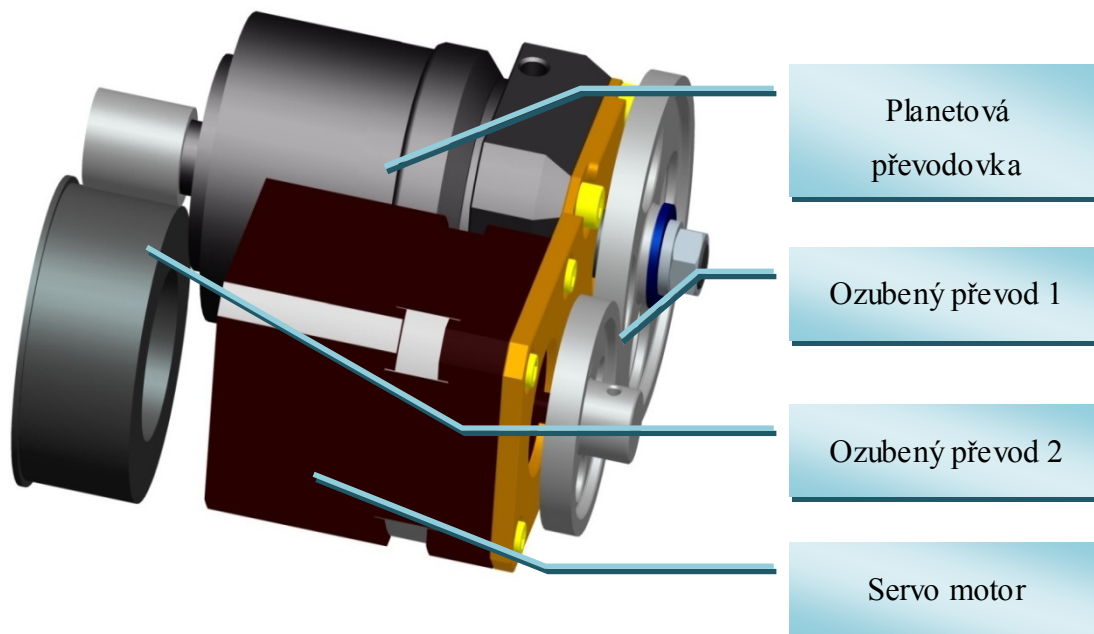
4.1 Varianta 1

Varianta 1 se skládá ze dvou stejných, navzájem o 90° otočených, rotačních jednotek umístěných v jedné skříni. Výstupem z rotační jednotky je příruba pro upevnění ramene manipulační nadstavby.

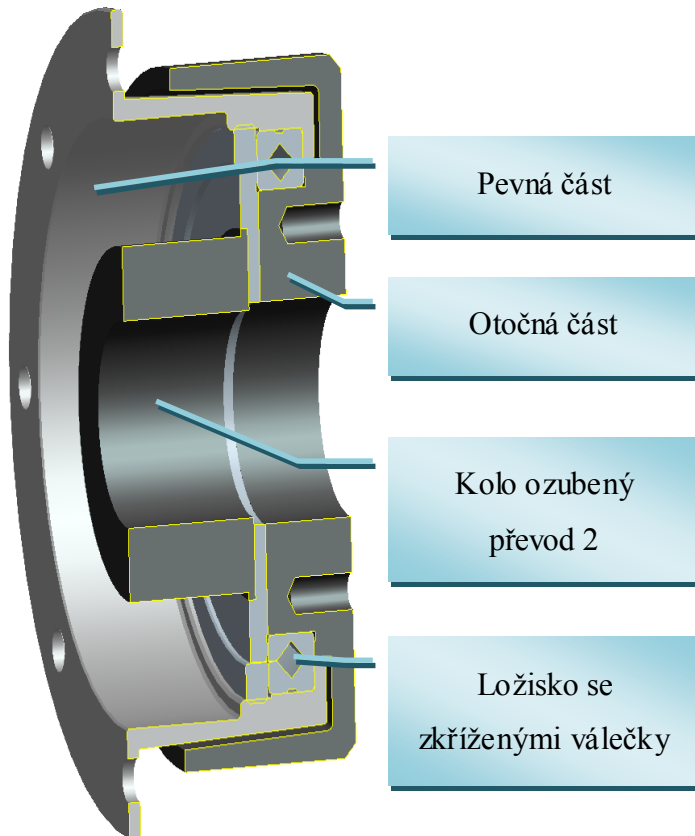


obr.11 Varianta 1

Rotační jednotka se skládá ze servo motoru, planetové převodovky a dvou ozubených převodů. U ozubeného převodu 2 je pastorek připevněn na výstupní hřídeli převodovky a kolo je připevněno k výstupní přírubě.



obr.12 Varianta 1 rotační jednotka

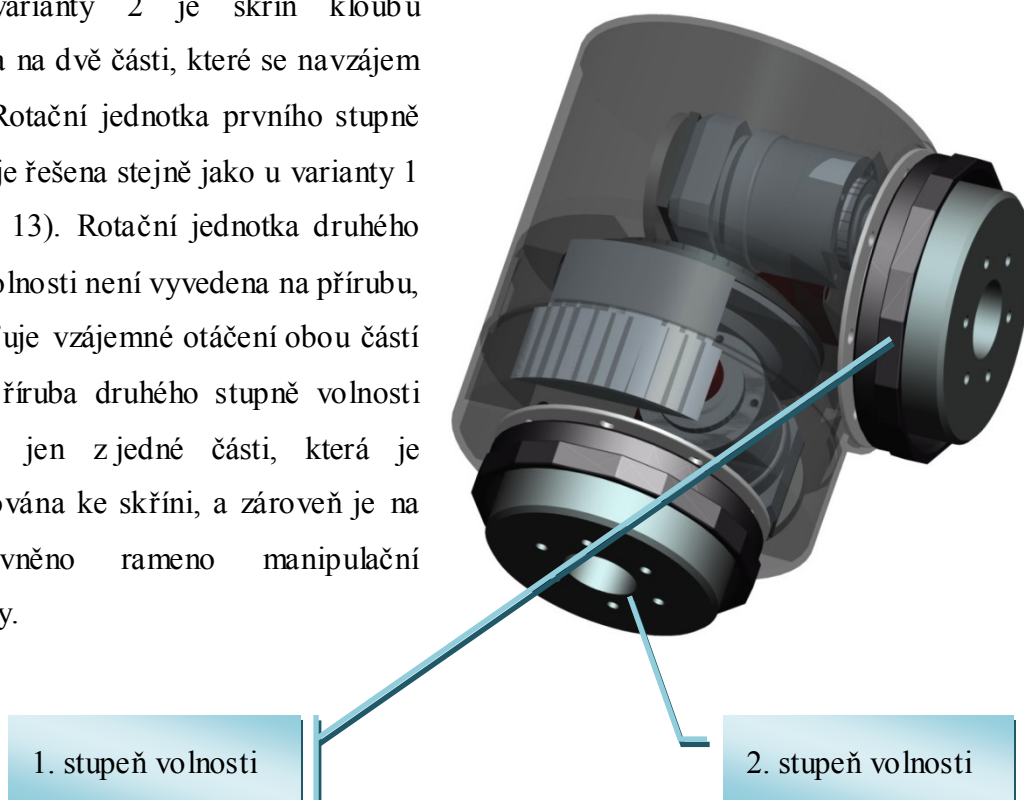


obr.13 Výstupní příruba

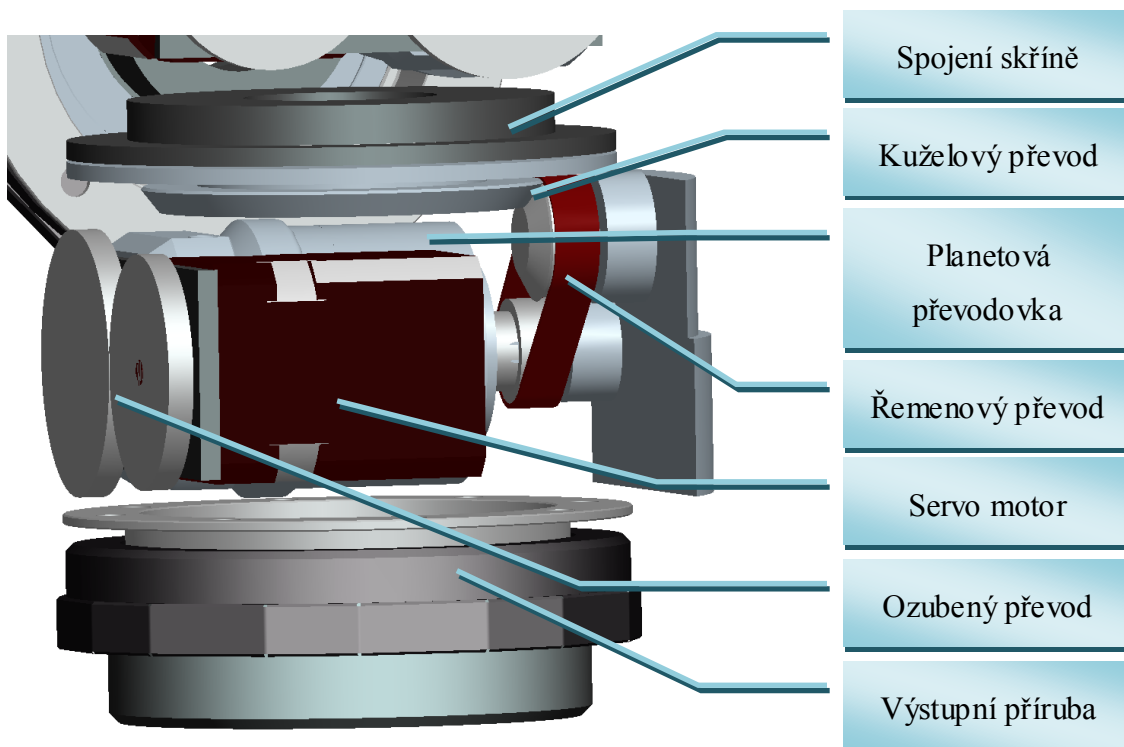
Výstupní příruba se skládá z otočné a pevné části, které jsou uloženy na ložisku se zkříženými válečky. Pevná část příruby je upevněna ke skříni kloubu. Na otočnou část se montuje rameno manipulační nadstavby, otočná část je spojena ozubeným kolem převodu 2. Příruba umožňuje vedení kabeláže svým středem.

4.2 Varianta 2

U varianty 2 je skříň kloubu rozdělena na dvě části, které se navzájem otáčejí. Rotační jednotka prvního stupně volnosti je řešena stejně jako u varianty 1 (obr. 12, 13). Rotační jednotka druhého stupně volnosti není vyvedena na přírubu, ale zajišťuje vzájemné otáčení obou částí skříně. Příruba druhého stupně volnosti se skládá jen z jedné části, která je přišroubována ke skříni, a zároveň je na ní upevněno rameno manipulační nadstavby.

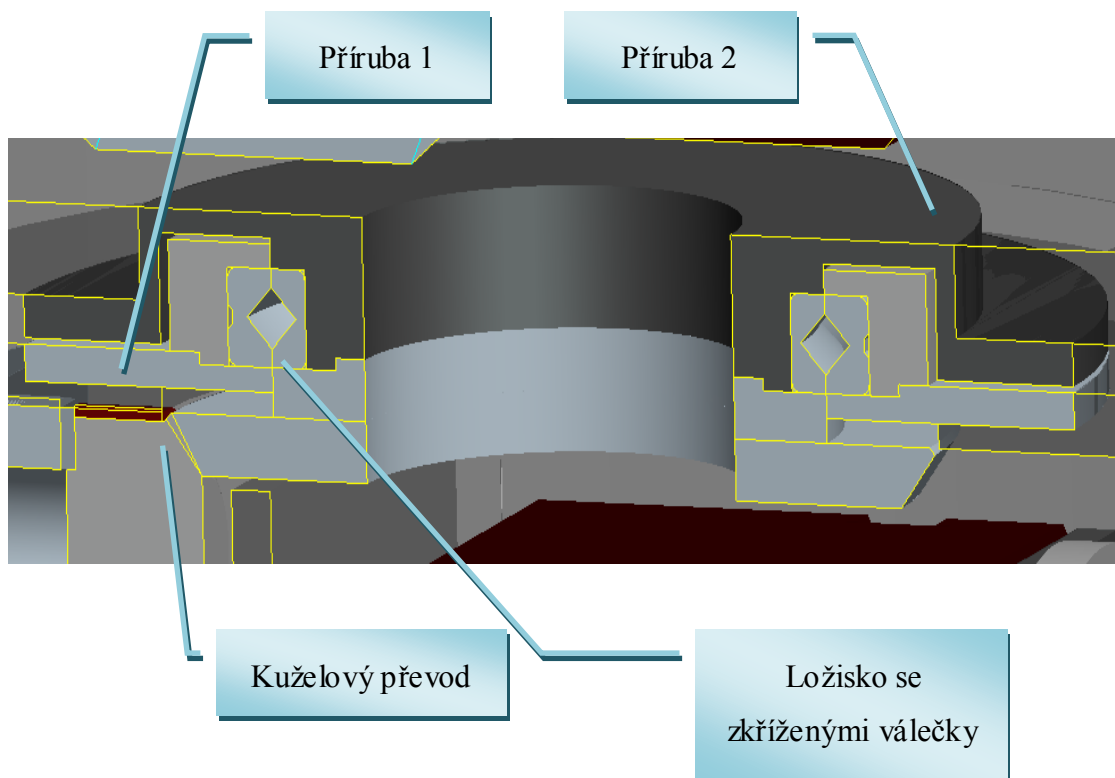


obr.14 Varianta 2



obr.15 Varianta 2 druhý stupeň volnosti

Rotační jednotka druhého stupně volnosti je tvořena servo motorem, který je přes ozubená kola spojen s planetovou převodovkou. Na výstupu z planetové převodovky je řemenový převod, jenž pohání kuželové soukolí.

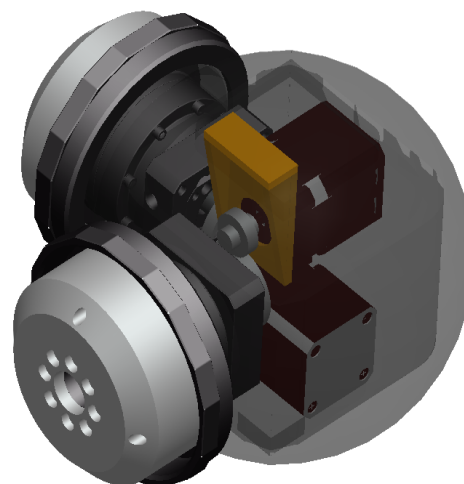


obr.16 Řez spojením skříně

Části skříně jsou přišroubovány na příruby 1 a 2. Příruby jsou uloženy na ložisku se zkříženými válečky. S přírubou 1 je spojeno kolo kuželového převodu, které zajišťuje otáčení jednotlivých částí skříně vůči sobě. Konstrukce spojení umožňuje vedení kabeláže jeho osou.

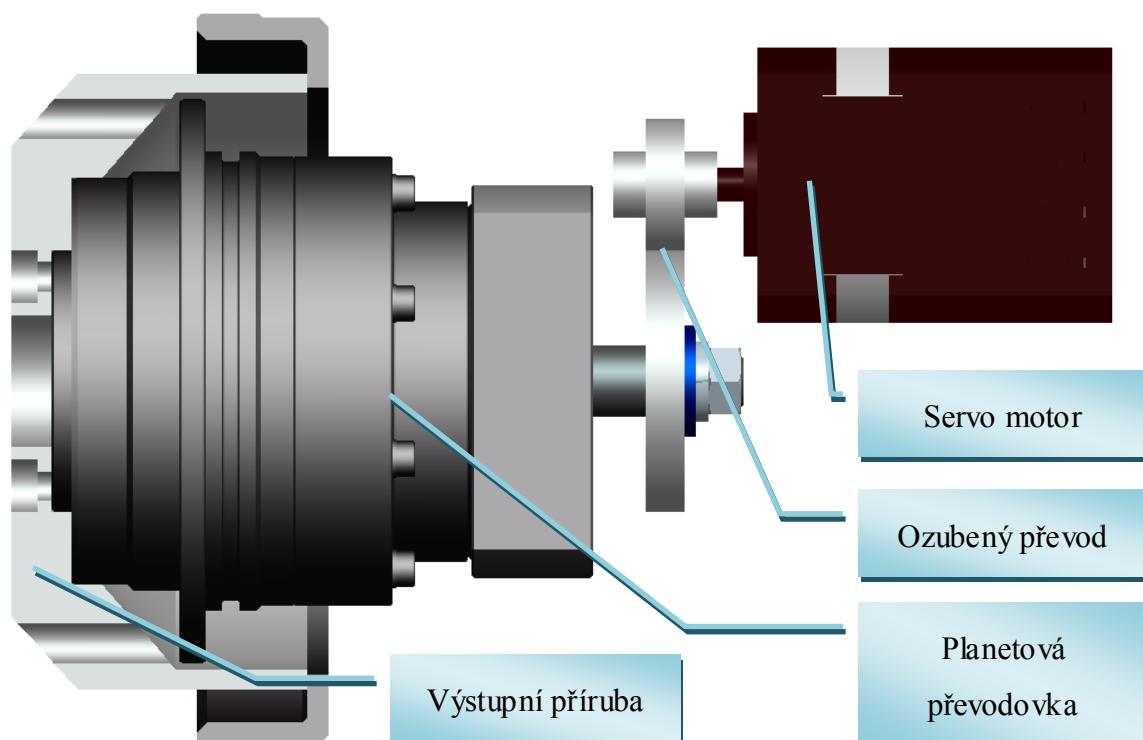
4.3 Varianta 3

Varianta 3 se skládá ze dvou stejných, navzájem o 90° otočených, rotačních jednotek umístěných v jedné skříně. Výstupem z rotační jednotky je příruba pro upevnění ramene manipulační nástavby.



obr.17 Varianta 3

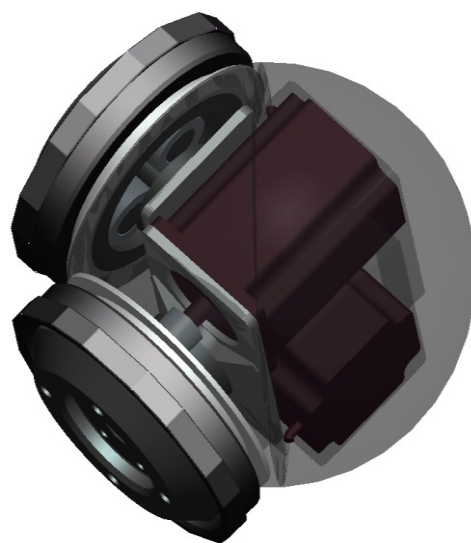
Rotační jednotka je tvořena servo motorem, který přes ozubený převod pohání planetovou převodovku. Na výstupu z planetové převodovky je přišroubována příruba pro připevnění ramene manipulační nadstavby. Tato varianta neumožňuje vedení kabeláže středem kloubu.



obr.18 *Varianta 3 rotační jednotka*

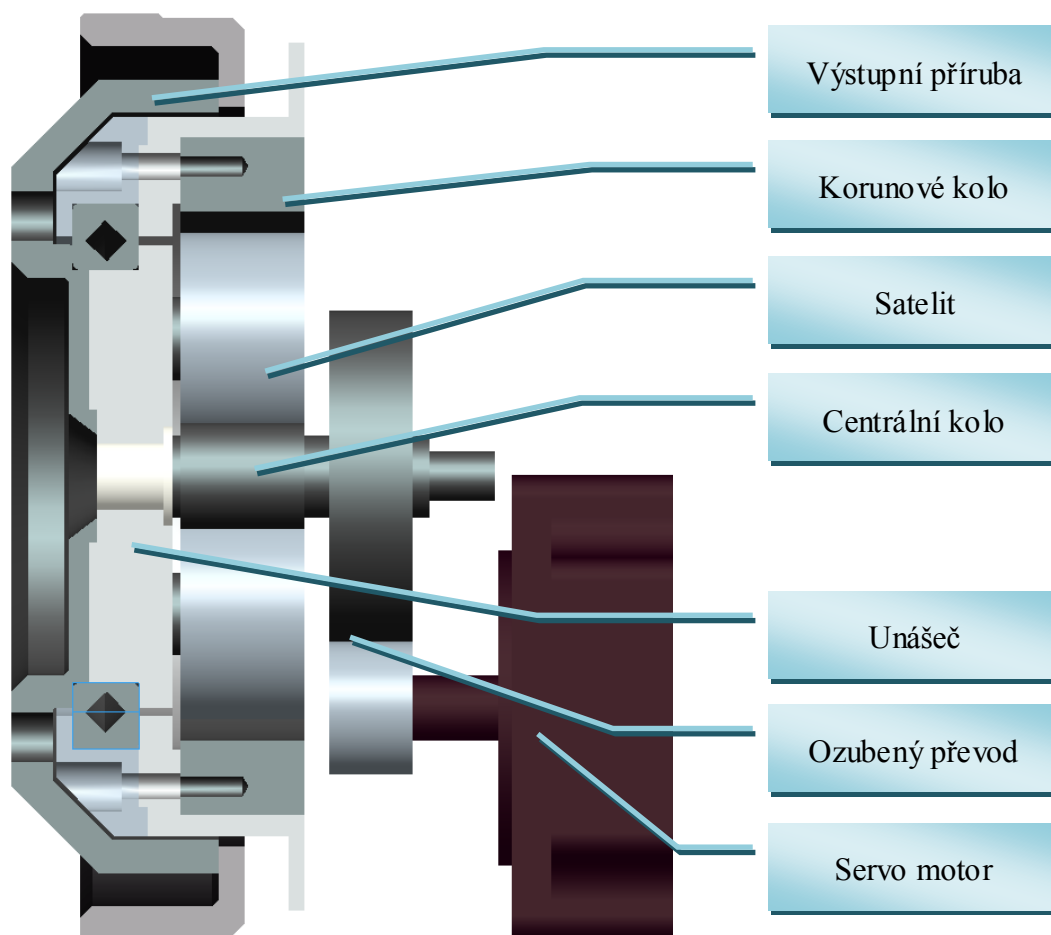
4.4 *Varianta 4*

Varianta 4 se skládá ze dvou stejných, navzájem o 90° otočených, rotačních jednotek umístěných v jedné skříni. Výstupem z rotační jednotky je příruba pro upevnění ramene manipulační nadstavby.



obr.19 *Varianta 4*

Servo motor přes ozubený převod pohání planetovou převodovku. Na výstupu z planetové převodovky je přišroubována příruba pro připojení ramene manipulační nadstavby. Rotační jednotka využívá planetovou převodovku vlastní konstrukce, která je vestavěna do pevné části příruby. Planetová převodovka má naháněné centrální kolo, výstup je na unášeči.



obr.20 Varianta 4 rotační jednotka

5 Hodnotová analýza

Hodnotovou analýzu jsem vytvořil na základě literatury [2].

5.1 Kritéria rozhodování

Varianty byly předběžně navrženy na stejný krouticí moment a rychlost polohování (viz seznam požadavků tab. 1).

Číslo kritéria	Kritérium	Charakteristika
1	Rozměry	
2	Hmotnost	
3	Využití prostoru	Poměr objemu komponent k objemu skříně.
4	Složitost konstrukce	Počet dílů, složitost dílů.
5	Vedení kabeláže	Vedení v přírubě, mimo přírubu, nutnost chránění kabeláže.
6	Cena	

tab.2 Kritéria rozhodování

5.2 Zhodnocení kritérií

Kritéria jsou hodnocena pro každou variantu body od 1 do 5. Čím je vyšší počet bodů, tím je kritérium příznivější.

Číslo varianty	Číslo kritéria					
	1	2	3	4	5	6
1	4	2	4	3	5	3
2	2	2	3	2	4	2
3	3	4	3	5	3	4
4	5	4	4	2	5	4

tab.3 Zhodnocení kritérií

5.3 Stanovení významnosti

Významnost jednotlivých kritérií byla stanovena metodou trojúhelníku páru. V tabulce jsou mezi sebou porovnávána všechna kritéria. Kritérium, kterému je přikládána větší významnost, je zobrazeno červeně. Významnost je stanovena na základě počtu voleb, platí zde lineární závislost *graf 1*.

Porovnávané kritéria					Počet voleb	Pořadí	Váha výz.
k1	k1	k1	k1	k1	4	2	1,8
k2	k3	k4	k5	k6			
	k2	k2	k2	k2	5	1	2
	k3	k4	k5	k6			
		k3	k3	k3	0,5	5-6	1,1
		k4	k5	k6			
			k4	k4	2,5	3-4	1,5
			k4	k6			
				k4	2,5	3-4	1,5
				k6			
					0,5	5-6	1,1

tab.4 Stanovení významnosti metodou trojúhelníku páru



graf 1

5.4 Index změny parametru a vážené indexy

Index změny

$$I_{ij} = \frac{H_{ij}}{H_{i0}}$$

H_{ij} – hodnota i-tého parametru j-té varianty

H_{i0} – základní hodnota i-tého parametru

Vážený index

$$I'_{ij} = I_{ij} \cdot q_i$$

q_i – váha významnosti i-tého parametru

Kritérium		Varianta			
		1	2	3	4
1	Hodnota	4	2	3	5
	Index	4	2	3	5
	Vážený index	7,2	3,6	5,4	9
2	Hodnota	2	2	4	4
	Index	2	2	4	4
	Vážený index	4	4	8	8
3	Hodnota	4	3	3	4
	Index	4	3	3	4
	Vážený index	4,4	3,3	3,3	4,4
4	Hodnota	3	2	5	2
	Index	3	2	5	2
	Vážený index	4,5	3	7,5	3
5	Hodnota	5	4	3	3
	Index	5	4	3	3
	Vážený index	7,5	9,5	4,5	7,5
6	Hodnota	3	2	4	4
	Index	3	2	4	4
	Vážený index	3,3	2,2	4,4	4,4

tab.5 Vážené indexy

5.5 Určení vítězné varianty

Pořadí variant určuje součet vážených indexů - čím vyšší součet tím vyšší pořadí varianty.

Číslo varianty	Součet vážených indexů	Pořadí variant
1	30,9	3
2	25,6	4
3	33,1	2
4	36,3	1

tab.6 Určení vítězné varianty

Dle provedené hodnotové analýzy byla vybrána varianta 4. Tato varianta bude podrobně zpracována.

6 Návrh kompaktního kloubu 1

6.1 Základní parametry

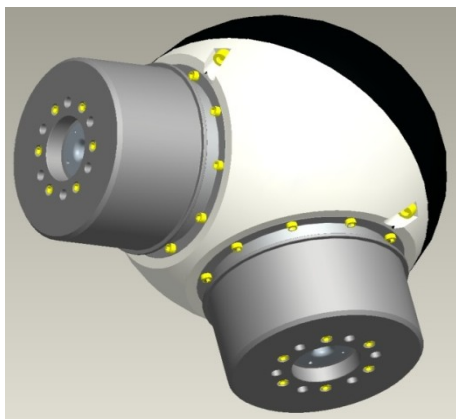
Hmotnost	6,15kg
Rychlost	40°/s
Rozsah pohybu	330°
Krouticí moment max/jmenovitý	60/30Nm

tab.7 Parametry kloubu

6.2 Popis konstrukce

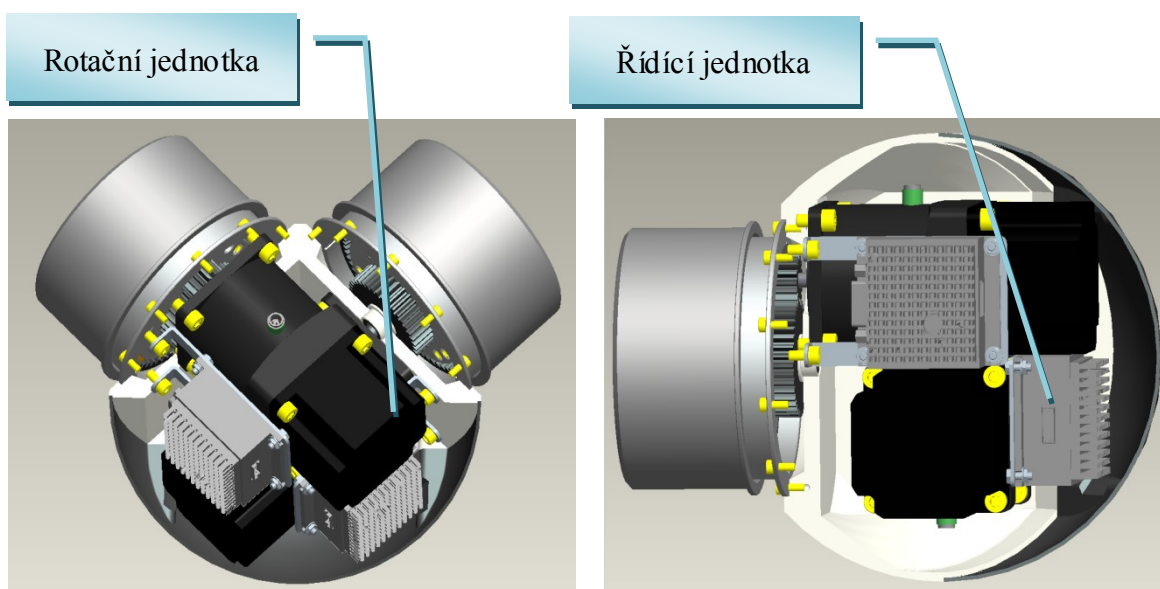
Kloub je navržen na základě varianty 4. Kloub tvoří dvě stejné rotační jednotky, jejichž osy rotace jsou navzájem otočeny o 90°.

Kloub je tvořen planetovou převodovkou vlastní konstrukce. Toto řešení má výhodu v tom, že můžeme převodovku tvarově a rozměrově přizpůsobit navrhovanému kloubu.



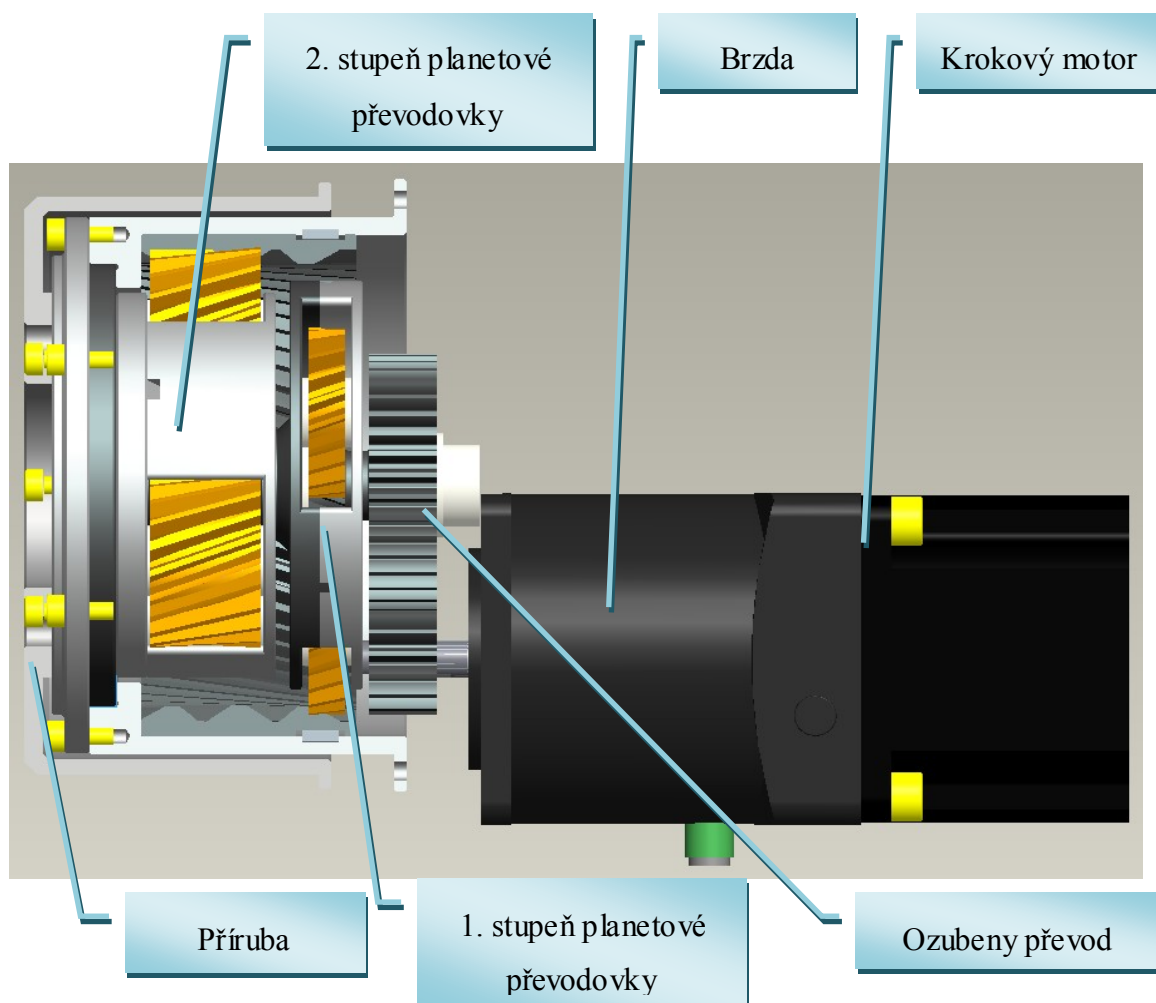
V našem případě se převodovku podařilo vestavět do přípojovací příruby. Při dimenzování převodovky bylo zjištěno, že bude muset být použito více stupňů převodu. Při použití jednoho stupně by převodovka dosáhla velkého průměru. Převodovky pohání přes ozubená kola krokové motory, které jsou vybaveny brzdou pro případ poruchy. Každá rotační jednotka je vybavena vlastní řídicí jednotkou.

obr.21 *Kompaktní kloub*



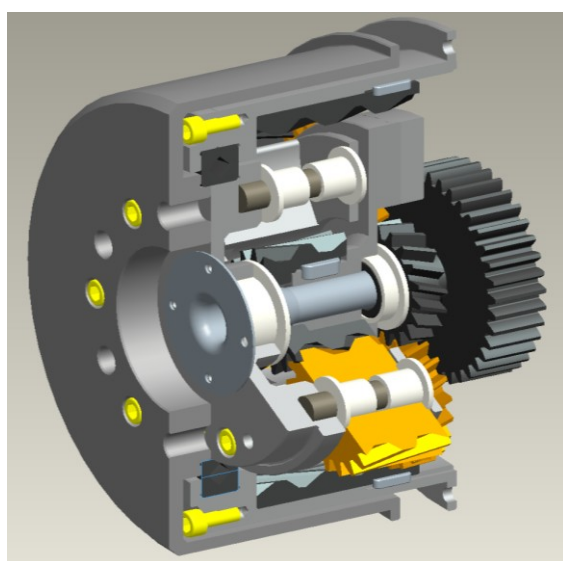
obr.22 *Rozložení komponent ve skříni kloubu*

Příruba je tvořena otočnou a pevnou částí, které jsou uloženy na ložisku se zkříženými válečky. Pevná část je přišroubována ke skříni kloubu. Na otočnou část se připevňuje rameno manipulační nadstavby.



obr.23 Rotační jednotka

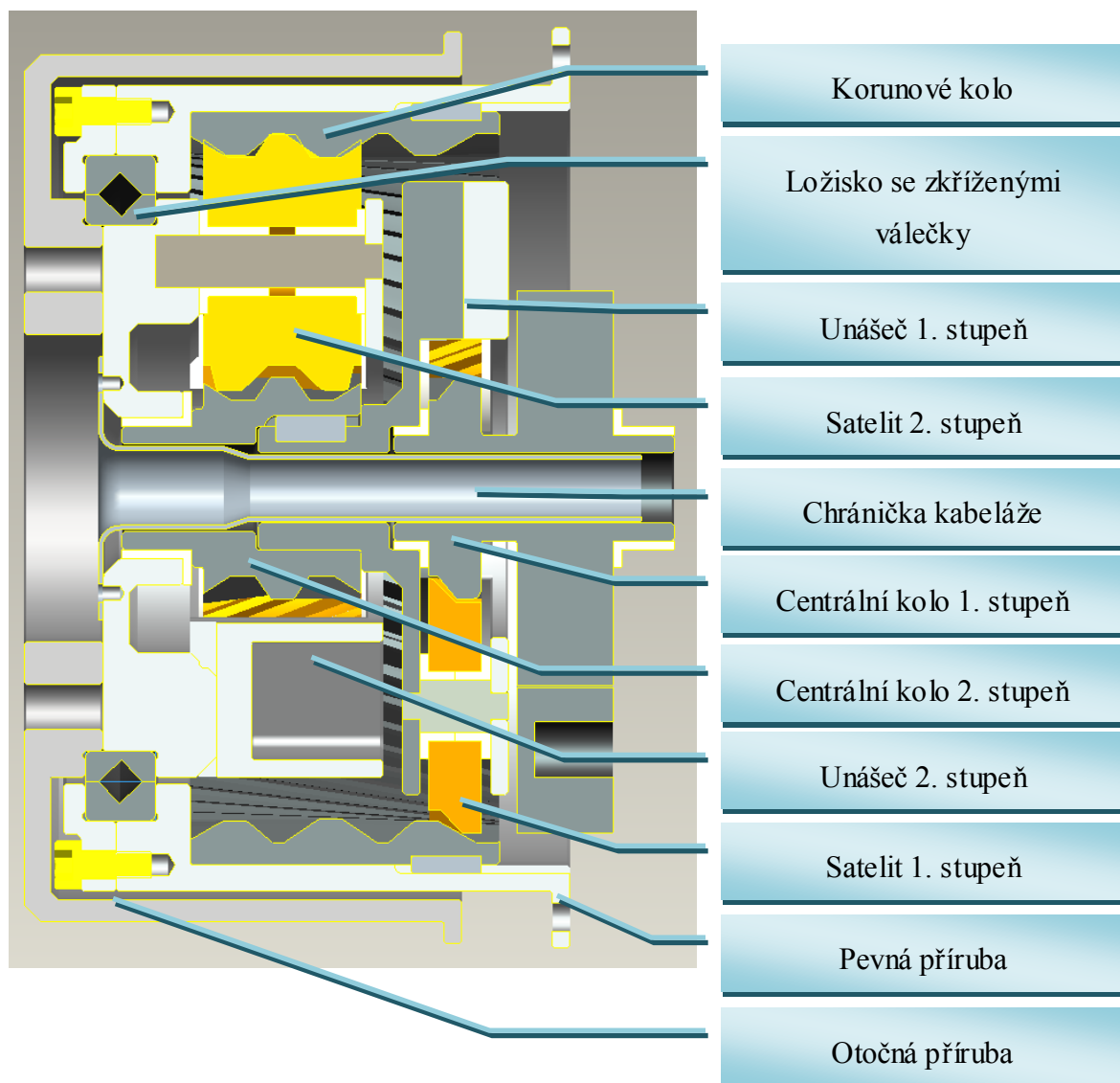
6.2.1 Popis převodů



obr.24 Částečný řez převodovkou

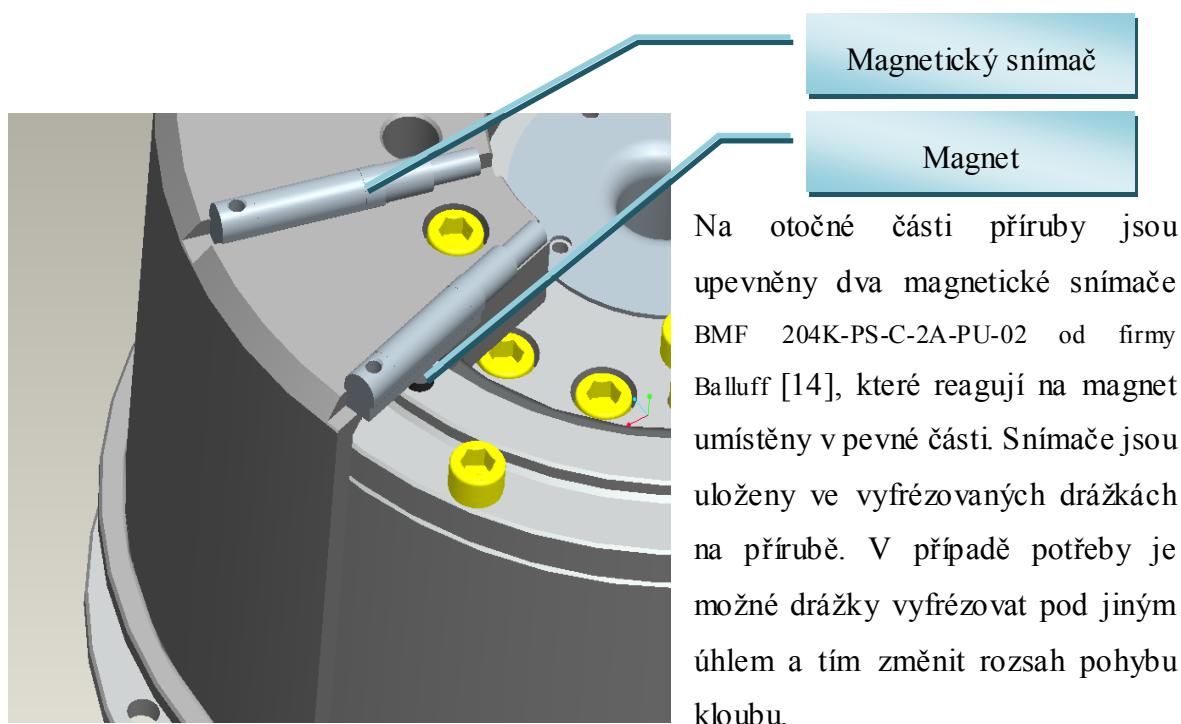
Převodovka je tvořena ozubeným převodem a dvoustupňovým planetovým převodem. Ozubený převod zajišťuje přenos krouticího momentu od motoru na centrální kolo 1. stupně planetové převodovky. Výstup z 1. stupně je na unášeci, který je vyveden na centrální kolo 2. stupně. Výstupem 2. stupně je unášec, na kterém je přišroubována příruba pro připojení ramene manipulační nástavby. Oba stupně

převodovky mají společné korunové kolo. Korunové kolo je zajištěno proti otáčení čtyřmi péry. Také přenos momentu mezi 1. a 2. stupněm převodovky zajišťuje péro. Všechny valivé části převodů jsou uloženy na kluzných ložiscích. Hřídele převodů jsou duté, aby jimi bylo možné vést kabeláž.



obr.25 Řez přírubou

6.2.2 Snímání koncové polohy



obr.26 Rozmístění koncových snímačů

7 Návrh kompaktního kloubu 2

Po domluvě s vedoucím práce bylo zadání doplněno o návrh druhého kloubu, který je schopen vyvodit větší krouticí moment na přírubě. Tento kloub bude umístěn v základu manipulační nadstavby.

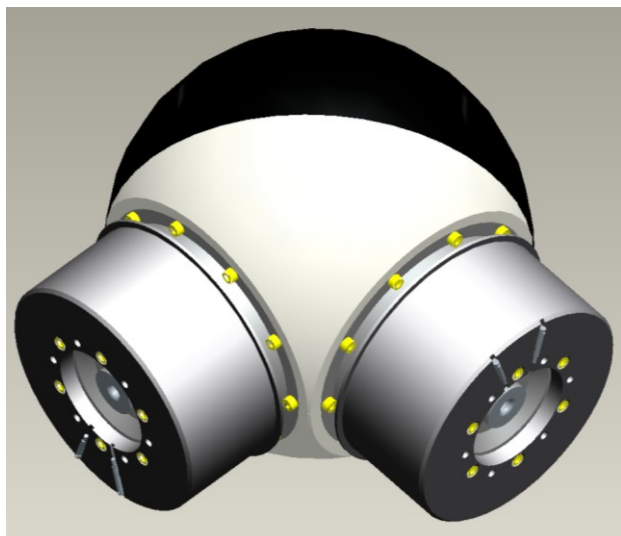
7.1 Základní parametry

Hmotnost	6,15kg
Rychlost	40°/s
Rozsah pohybu	330°
Krouticí moment max./jmenovitý	150/80Nm

tab.8 Parametry kloubu

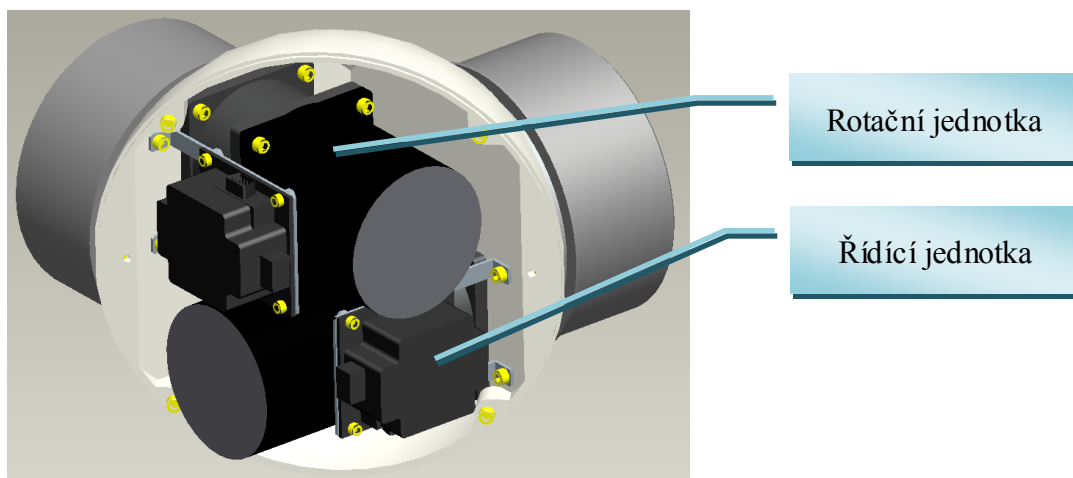
7.2 Popis konstrukce

Jedná se o konstrukčně podobné řešení jako kloub 1, jen je dimenzován na vyšší krouticí momenty. Z toho plynou větší rozměry a vyšší hmotnost.



Kloub se skládá ze dvou stejných rotačních jednotek, které jsou navzájem otočeny o 90°. Rotační jednotka je tvořena dvoustupňovou planetovou převodovkou vlastní konstrukce. Planetová převodovka je přes ozubený převod poháněna krokovým motorem. Pro případ poruchy je jednotka vybavena brzdou.

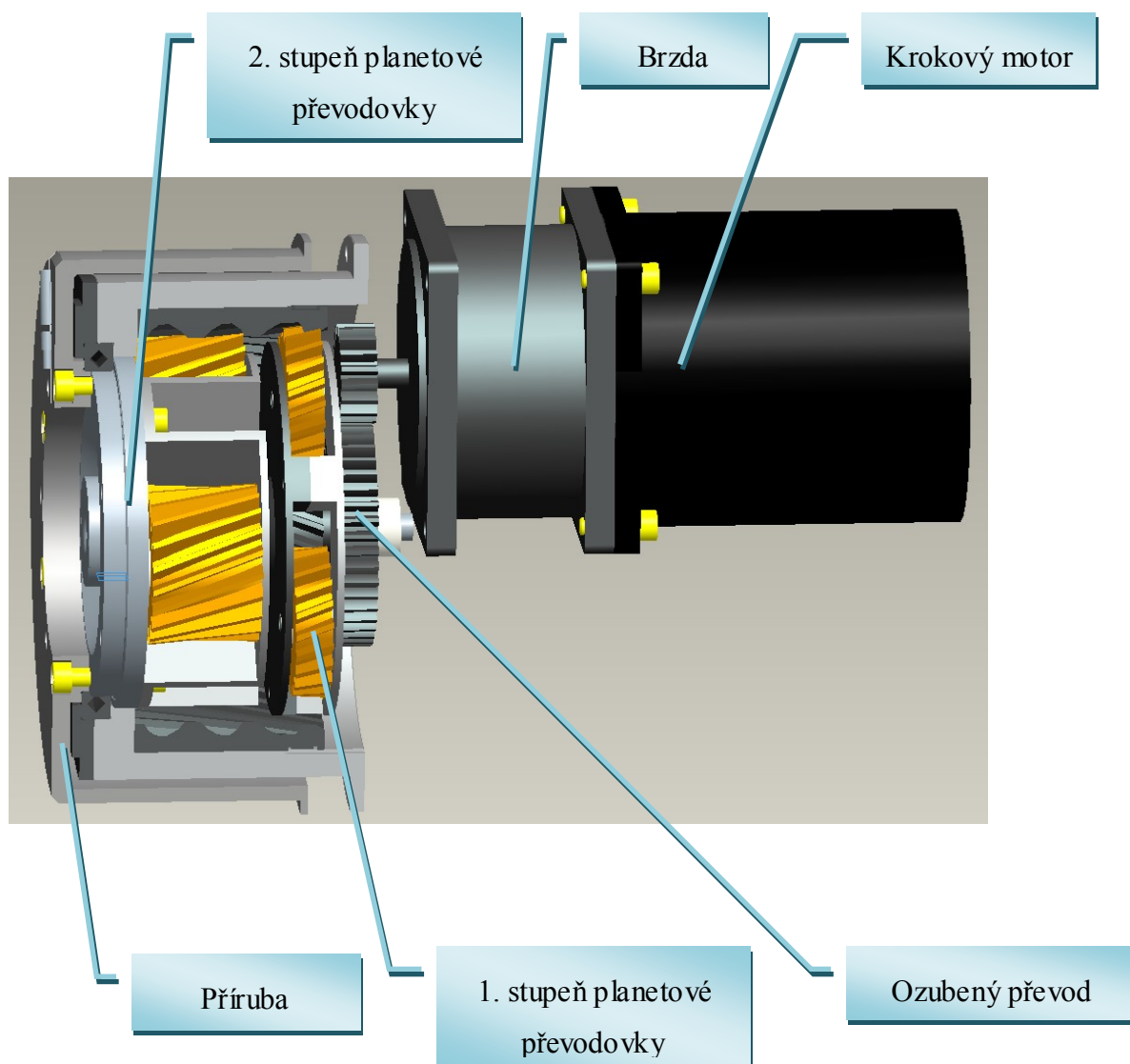
obr.27 Kloub 2



obr.28 Rozložení komponent ve skříni kloubu

7.3 Popis převodů

Převodovka je obdobné konstrukce jako u kloubu 1. Liší se svými rozměry. Některé díly jsou z konstrukčních důvodů tvarově odlišné.



obr.29 Pohled na rotační jednotku a převody – kloub 2

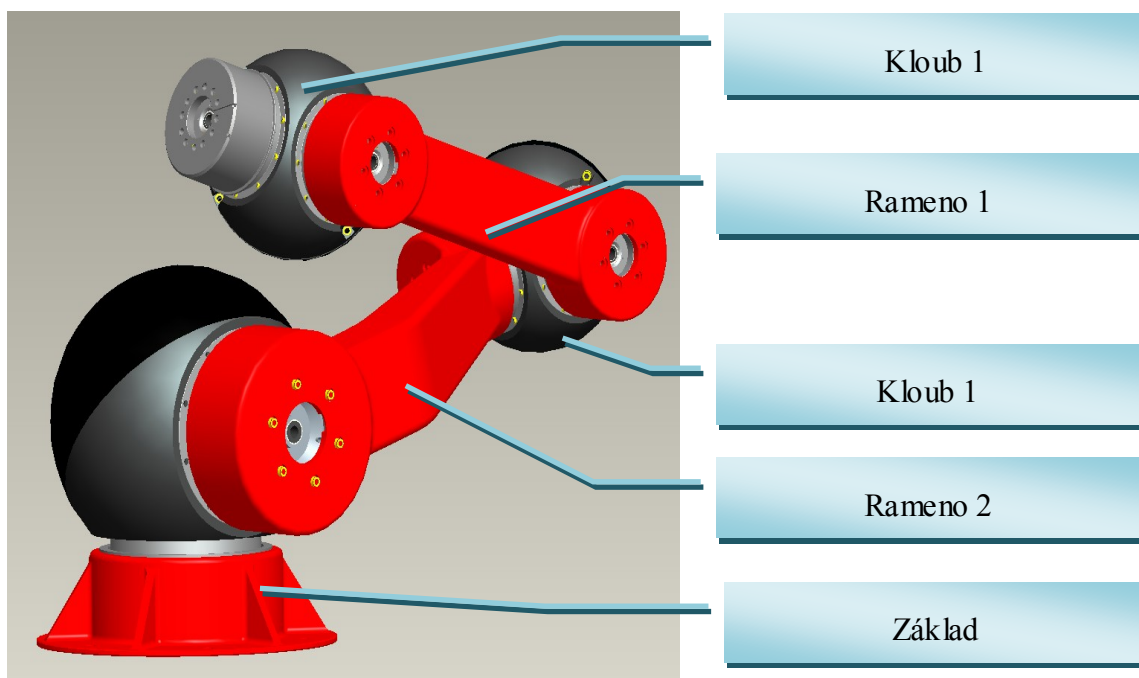
7.3.1 Snímání koncové polohy

Ke snímání koncové polohy rotační jednotky jsou použity stejné snímače jako u kloubu 1. Také způsob jejich uložení na přírubě je stejný.

8 Návrh referenční manipulační nadstavby

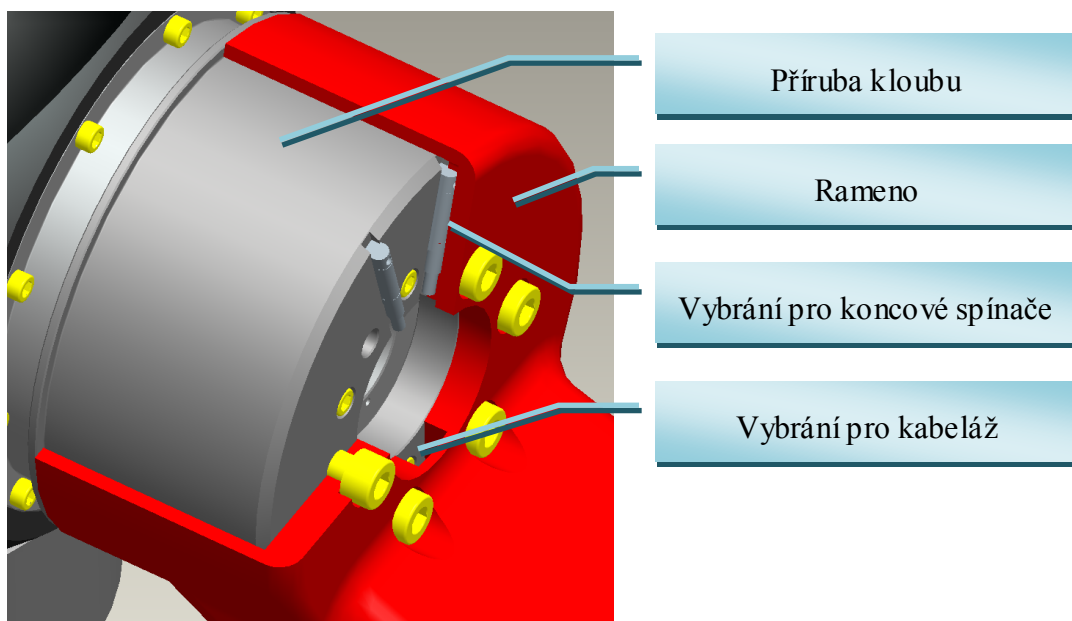
8.1 Sestava

Společně s klouby byla navržena manipulační nadstavba. Manipulační nadstavba má dosah 0.8m a nosnost 4kg. Rychlost polohování odpovídá rychlosti otáčení rotačních jednotek 40°/s. Hmotnost celé nadstavby je 43,3kg.



obr.30 Sestava nadstavby

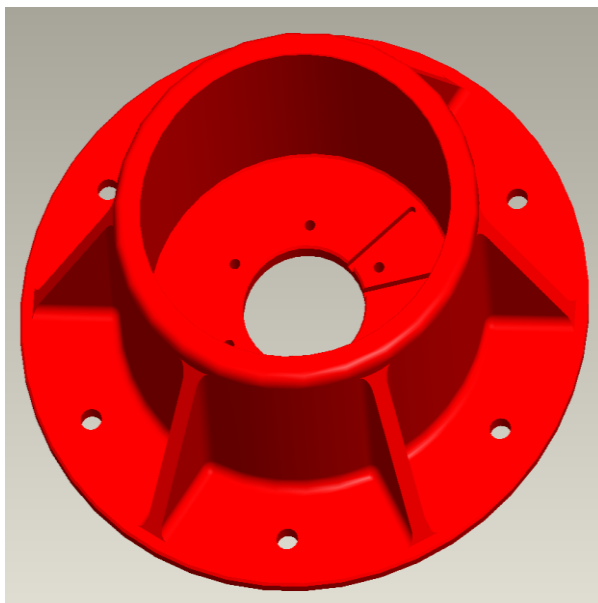
Ramena se připevňují na přírubu pomoci šesti šroubů. Připojovací část ramene rozměrově odpovídá rozměrům příruby příslušného kloubu. Dále je vybavena vybráním pro vedení kabeláže a vybráním pro koncové snímače.



obr.31 *Spojení ramene s přírubou*

8.2 Komponenty

Základ je vyroben z oceli, jeho hmotnost je 6.9Kg.



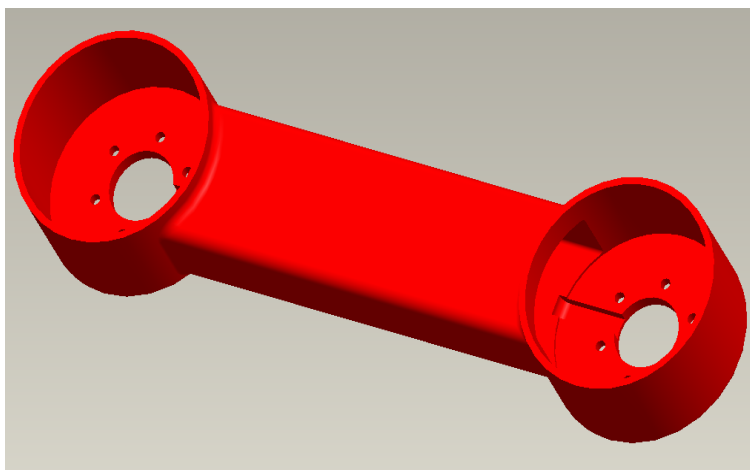
obr.32 *Základ*

Rameno 1 je vyrobeno z hliníkové slitiny, jeho hmotnost je 2,27kg.



obr.33 *Rameno 1*

Rameno 2 je vyrobeno z hliníkové slitiny, jeho hmotnost je 0,97kg.



obr.34 *Rameno 2*

9 Návrh pohonů

9.1 Návrh převodů

Nejprve jsem navrhl převody v programu Mítcalc. Převody byly navrženy tak, aby bylo dosaženo maximálního krouticího momentu na výstupní přírubě, při dodržení žádaných rozměru příruby a dodržení polohovací rychlosti (*tab. 1*).

Návrh jsem prováděl při maximální polohovací rychlosti z důvodu, že se předpokládá použití krokových motorů, které mají velký pokles krouticího momentu s rostoucími otáčkami. Hodnoty v tabulkách odpovídají maximální polohovací rychlosti kloubu.

9.1.1 Základní parametry jednotlivých částí převodovky

Kloub 1

tab.9 Síly na 1. stupni planetové převodovky kloub1

Přenášený výkon	Pw [kW]	0,025	0,025	<= Max. Pw
Otáčky pastorku / kola	n [/min]	300,0	134,2	i <= n1,n2
Krouticí moment (pastorek / kolo)	Mk [Nm]	0,80	1,76	Pw <= Mk,n
Požadovaný převodový poměr / z tabulky	i	2,24	*2,24	
Skutečný převodový poměr / odchylka	i	2,24	-0,21%	

tab.10 Parametry ozubeného soukolí kloub1

1.1 Jednotky výpočtu	SI Units (N, mm, kW...)			
1.2 Typ převodu hnací/hnané (vstup/výstup)	Centrální kolo => Unašeč			
1.3 Přenášený výkon	Pw [kW]	0,03	-0,03	0,00 <= Max. Pw
1.4 Otáčky (centrální kolo, unašeč, korunové kolo)	n	134,20	30,97	0,00 []/min
1.5 Požadované otáčky pro: Unašeč	n	30,00	11,35 ~ 33,55	> z0,z1,z2
1.6 Krouticí moment (centrální kolo, unašeč, korunové kolo)	Mk	1,78	-7,71	5,93 [Nm]
1.7 Otáčky (satelit vůči unašeči)	n		-88,48	[]/min
1.8 Převodový poměr z1/z0, z2/z1, (z2/z0)	i	1,167	-2,857	(-3,333)

tab.11 Parametry 1. stupně planetové převodovky kloub1

1.1 Jednotky výpočtu	SI Units (N, mm, kW...)			
1.2 Typ převodu hnací/hnané (vstup/výstup)	Centrální kolo => Unašeč			
1.3 Přenášený výkon	Pw [kW]	0,03	-0,03	0,00 <= Max. Pw
1.4 Otáčky (centrální kolo, unašeč, korunové kolo)	n	30,97	7,15	0,00 []/min
1.5 Požadované otáčky pro: Unašeč	n	5,00	2,62 ~ 7,74	> z0,z1,z2
1.6 Krouticí moment (centrální kolo, unašeč, korunové kolo)	Mk	7,71	-33,41	25,70 [Nm]
1.7 Otáčky (satelit vůči unašeči)	n		-20,42	[]/min
1.8 Převodový poměr z1/z0, z2/z1, (z2/z0)	i	1,167	-2,857	(-3,333)

tab.12 Parametry 2. stupně planetové převodovky kloub1

V tabulkách (tab.1-7) jsou zobrazeny základní parametry jednotlivých částí převodu. Krouticí moment motoru odpovídá hodnotě *krouticí moment pastorek* (tab. 7). Moment na přírubě odpovídá hodnotě *krouticí moment unašeč* (tab. 9).

Kloub 2

Přenášený výkon	Pw	0,075	0,074	[kW]
Otáčky pastorku / kola	n [/min]	300,0	135,0	$i \leq n_1, n_2$
Krouticí moment (pastorek / kolo)	Mk [Nm]	2,39	5,24	$Pw \leq Mk, n$
Požadovaný převodový poměr / z tabulky	i	2,24	*2,24	
Skutečný převodový poměr / odchylka	i	2,22	-0,80%	

tab.13 Parametry ozubeného soukolí kloub2

Jednotky výpočtu	SI Units (N, mm, kW...)				
Typ převodu hnací/hnané (vstup/výstup)	Centrální kolo => Unašeč				
Přenášený výkon	Pw [kW]	0,08	-0,08	0,00	<= Max. Pw
Otáčky (centrální kolo, unašeč, korunové kolo)	n	135,00	31,15	0,00	<input type="checkbox"/> [/min]
Požadované otáčky pro: Unašeč	n	30,00	11,42 ~ 33,75		> z0,z1,z2
Krouticí moment (centrální kolo, unašeč, korunové kolo)	Mk	5,31	-22,99	17,69	[Nm]
Otáčky (satelit vůči unašeči)	n		-89,01		[/min]
Převodový poměr z1/z0, z2/z1, (z2/z0)	i	1,167	-2,857	(-3,333)	

tab.14 Parametry 1. stupně planetové převodovky kloub2

Jednotky výpočtu	SI Units (N, mm, kW...)				
Typ převodu hnací/hnané (vstup/výstup)	Centrální kolo => Unašeč				
Přenášený výkon	Pw [kW]	0,08	-0,08	0,00	<= Max. Pw
Otáčky (centrální kolo, unašeč, korunové kolo)	n	31,15	7,19	0,00	<input type="checkbox"/> [/min]
Požadované otáčky pro: Unašeč	n	7,00	2,63 ~ 7,79		> z0,z1,z2
Krouticí moment (centrální kolo, unašeč, korunové kolo)	Mk	22,99	-99,64	76,65	[Nm]
Otáčky (satelit vůči unašeči)	n		-20,54		[/min]
Převodový poměr z1/z0, z2/z1, (z2/z0)	i	1.167	-2.857	(-3.333)	

tab.15 Parametry 2. stupně planetové převodovky kloub2

9.1.2 Převodový poměr

Kloub 1

$$i = i_1 \cdot i_2 \cdot i_3 = i_1 + \frac{n_{11}}{n_{u1}} \cdot \frac{n_{12}}{n_{u2}} = 2,24 \cdot \frac{134,2}{30,97} \cdot \frac{30,97}{7,15} = 41,96$$

Kloub 2

$$i = i_1 + i_2 + i_3 = i_1 + \frac{n_{11}}{n_{u1}} + \frac{n_{12}}{n_{u2}} = 2,24 \cdot \frac{135}{31,15} \cdot \frac{31,15}{7,19} = 41,72$$

n_{11} – otáčky centrální kolo 1. stupeň

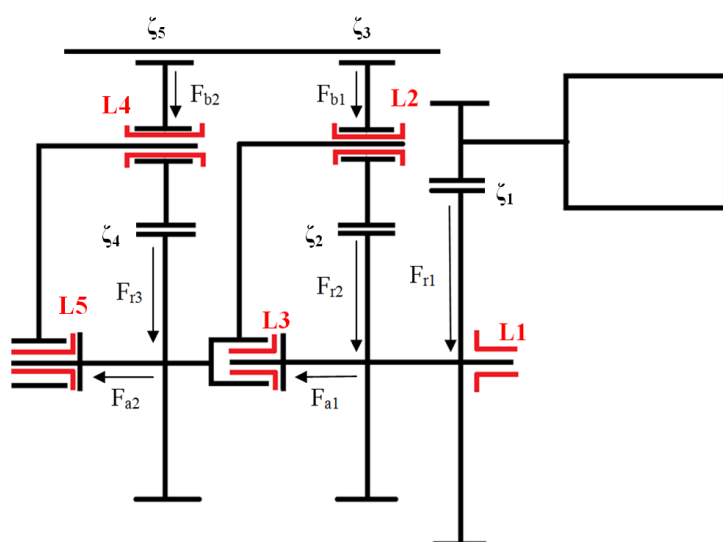
n_{12} – otáčky centrální kolo 2. stupeň

n_{u1} – otáčky unášeč 1. stupeň

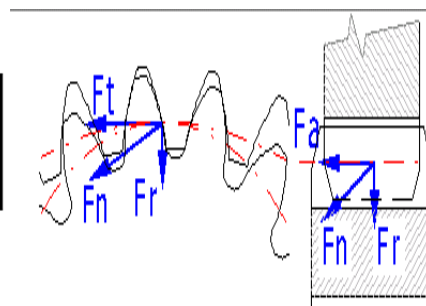
n_{u2} – otáčky unášeč 2. stupeň

9.1.3 Účinnost převodovky

Na obrázku (obr. 35) je zobrazeno schéma převodu. Vyznačené síly působící na ložiska byly vypočítány v programu Mitcalc (tab. 16 - 21). Ztráty na ozubení jsou také vypočítané v Mitcalcu. Ložiska jsou zobrazena červeně, označena písmenem L a číslem. Značení průměru ložisek první index viz (obr. 25) druhý index odpovídá číslu ložiska.



obr.36 Schéma převodu



obr.35 Působení sil na ozubení

Kloub 1

Obvodová síla	Ft	83,22		[N]
Normální síla	Fn	88,57		[N]
Axiální síla	Fa	0,00		[N]
Radiální síla	Fr	30,29		[N]
Ohybový moment	Mo	0,00	0,00	[Nm]
Obvodová rychlost na roztečné kružnici	v vmax	0,30	< 15	[m/s]
Šířkové zatížení / měrné zatížení	wt wt*	7,57	6,73	[N/mm MPa]

tab.16 Síly na ozubeném soukolí kloub1

Obvodová síla	Ft	51,60	51,60	[N]	
Normální síla	Fn	58,43	58,43	[N]	
Axiální síla	Fa	56,34	0,00	-56,34	[N]
Radiální síla	Fr	19,99	-19,99	[N]	
Síla unašeč -> satelit	Fc-p	103,20		[N]	
Odstředivá síla na satelit	Fc	0,00		[N]	
Radiální síla na ložisko v satelitu	Fb	103,20		[N]	
Jmenovitý krouticí moment	Mk	0,59	0,69	1,98	[Nm]
Jmenovité otáčky	n	103,2	-88,5	31,0	[/min]
Ohybový moment (satelit)	Mo	0,00	0,55	0,00	[Nm]
Obvodová rychlost na roztečné kružnici	v vmax	0,124	< 30	[m/s]	
Šířkové zatížení	wt	8,600	8,60	[N/mm]	
Měrné zatížení	wt*	7,17	7,17	[MPa]	

tab.17 Síly na 1. stupni planetové převodovky kloub1

Obvodová síla	Ft	223,59	223,59	[N]	
Normální síla	Fn	253,20	253,20	[N]	
Axiální síla	Fa	244,14	0,00	-244,14	[N]
Radiální síla	Fr	86,60	-86,60	[N]	
Síla unašeč -> satelit	Fc-p	447,17		[N]	
Odstředivá síla na satelit	Fc	0,00		[N]	
Radiální síla na ložisko v satelitu	Fb	447,17		[N]	
Jmenovitý krouticí moment	Mk	2,57	3,00	8,57	[Nm]
Jmenovité otáčky	n	23,8	-20,4	7,1	[/min]
Ohybový moment (satelit)	Mo	0,00	2,37	0,00	[Nm]
Obvodová rychlost na roztečné kružnici	v vmax	0,029	< 30	[m/s]	
Šířkové zatížení	wt	12,421	12,42	[N/mm]	
Měrné zatížení	wt*	10,35	10,35	[MPa]	

tab.18 Síly na 2. stupni planetové převodovky kloub1

Kloub 2

Obvodová síla	Ft	192,93		[N]
Normální síla	Fn	205,31		[N]
Axiální síla	Fa	0,00		[N]
Radiální síla	Fr	70,22		[N]
Ohybový moment	Mo	0,00	0,00	[Nm]
Obvodová rychlost na roztečné kružnici	v vmax	0,39	< 8	[m/s]
Šířkové zatížení / měrné zatížení	wt wt*	19,29	14,03	[N/mm MPa]

tab.19 Síly na ozubeném soukolí kloub2

Obvodová síla	Ft	105,52	105,52		[N]
Normální síla	Fn	119,49	119,49		[N]
Axiální síla	Fa	115,21	0,00	-115,21	[N]
Radiální síla	Fr	40,87	-40,87		[N]
Síla unašeč -> satelit	Fc-p	211,03			[N]
Odstředivá síla na satelit	Fc	0,02			[N]
Radiální síla na ložisko v satelitu	Fb	211,03			[N]
Jmenovitý krouticí moment	Mk	1,77	2,06	5,90	[Nm]
Jmenovité otáčky	n	103,8	-89,0	31,2	[/min]
Ohybový moment (satelit)	Mo	0,00	1,63	0,00	[Nm]
Obvodová rychlost na roztečné kružnici	v vmax	0,182	< 30		[m/s]
Šířkové zatížení	wt	10,552	10,55		[N/mm]
Měrné zatížení	wt*	6,03	6,03		[MPa]

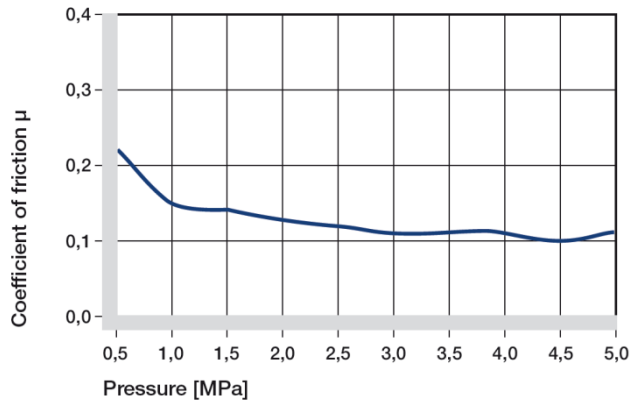
tab.20 Síly na 1. stupni planetové převodovky kloub2

Obvodová síla	Ft	457,29	457,29		[N]
Normální síla	Fn	517,87	517,87		[N]
Axiální síla	Fa	499,32	0,00	-499,32	[N]
Radiální síla	Fr	177,12	-177,12		[N]
Síla unašeč -> satelit	Fc-p	914,58			[N]
Odstředivá síla na satelit	Fc	0,00			[N]
Radiální síla na ložisko v satelitu	Fb	914,58			[N]
Jmenovitý krouticí moment	Mk	7,66	8,94	25,55	[Nm]
Jmenovité otáčky	n	24,0	-20,5	7,2	[/min]
Ohybový moment (satelit)	Mo	0,00	7,06	0,00	[Nm]
Obvodová rychlost na roztečné kružnici	v vmax	0,042	< 30		[m/s]
Šířkové zatížení	wt	15,243	15,24		[N/mm]
Měrné zatížení	wt*	8,71	8,71		[MPa]

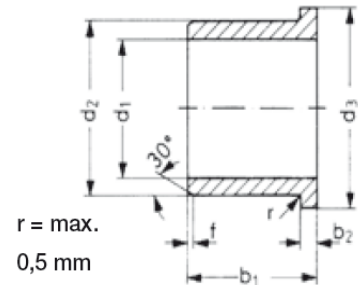
tab.21 Síly na 2. stupni planetové převodovky kloub2

Koeficienty tření

V převodovce jsou použity třecí pouzdra s přírubou od firmy Igus iglidur J3[15]. Z grafu je patrné, že koeficient tření je závislý na zatížení.



graf 2 Závislost koeficientu tření na zatížení[15].



obr.37 Rozměry ložiska[15].

Zatížení v jednotlivých ložiskách kloub 1

$$p_1 = \frac{F_{r1} + F_{r2} + F_{r3}}{d_{11} \cdot b_{11}} \cdot 10^{-6} = \frac{30,29 + 19,99 + 86,52}{0,012 \cdot 0,007} \cdot 10^{-6} = 2,4 \text{ MPa} \approx \mu_1 = 0,11$$

$$p_2 = \frac{F_{b1}}{d_{12} \cdot 2b_{12}} \cdot 10^{-6} = \frac{103}{0,006 \cdot 2 \cdot 0,003} \cdot 10^{-6} = 3,25 \text{ MPa} \approx \mu_2 = 0,1$$

$$p_3 = \frac{F_{r1} + F_{r2} + F_{r3}}{d_{13} \cdot b_{13}} \cdot 10^{-6} = \frac{30,29 + 19,99 + 86,52}{0,012 \cdot 0,004} \cdot 10^{-6} = 4,14 \text{ MPa} \approx \mu_{31} = 0,1$$

$$p_4 = \frac{F_{b1}}{d_{14} \cdot 2b_{14}} \cdot 10^{-6} = \frac{446,74}{0,006 \cdot 2 \cdot 0,008} \cdot 10^{-6} = 5 \text{ MPa} \approx \mu_4 = 0,1$$

$$p_5 = \frac{F_{r1} + F_{r2} + F_{r3}}{d_{15} \cdot b_{15}} \cdot 10^{-6} = \frac{30,29 + 19,99 + 86,52}{0,014 \cdot 0,008} \cdot 10^{-6} = 1,78 \text{ MPa} \approx \mu_5 = 0,13$$

Zatížení v jednotlivých ložiskách kloub 2

$$p_1 = \frac{F_{r1} + F_{r2} + F_{r3}}{d_{11} \cdot b_{11}} \cdot 10^{-6} = \frac{70,22 + 40,87 + 177,12}{0,012 \cdot 0,007} \cdot 10^{-6} = 2,4 \text{ MPa} \approx \mu_1 = 0,12$$

$$p_2 = \frac{F_{b1}}{d_{12} \cdot 2b_{12}} \cdot 10^{-6} = \frac{211}{0,008 \cdot 2 \cdot 0,005} \cdot 10^{-6} = 7,9 \text{ MPa} \approx \mu_2 = 0,1$$

$$p_3 = \frac{F_{r1} + F_{r2} + F_{r3}}{d_{13} \cdot b_{13}} \cdot 10^{-6} = \frac{70,22 + 40,87 + 177,12}{0,012 \cdot 0,007} \cdot 10^{-6} = 2,4 \text{ MPa} \approx \mu_3 = 0,12$$

$$p_4 = \frac{F_{b1}}{d_{14} \cdot 2b_{14}} \cdot 10^{-6} = \frac{914,58}{0,012 \cdot 2 \cdot 0,016} \cdot 10^{-6} = 17,15 \text{ MPa} \approx \mu_4 = 0,1$$

$$p_5 = \frac{F_{r1} + F_{r2} + F_{r3}}{d_{15} \cdot b_{15}} \cdot 10^{-6} = \frac{70,22 + 40,87 + 177,12}{0,018 \cdot 0,012} \cdot 10^{-6} = 1,3 \text{ MPa} \approx \mu_5 = 0,15$$

Ztrátové momenty na jednotlivých ložiskách kloub 1

$$M_{T1} = \mu_1 \cdot \frac{F_{r1} + F_{r2} + F_{r3}}{2} \cdot \frac{d_{11}}{2} = 0,11 \cdot \frac{30,29 + 19,99 + 86,52}{2} \cdot \frac{0,012}{2} = 0,09 \text{ Nm}$$

$$M_{T2} = \mu_2 \cdot F_{b1} \cdot \frac{d_{12}}{2} = 0,1 \cdot 103 \cdot \frac{0,006}{2} = 0,03 \text{ Nm}$$

$$\begin{aligned} M_{T3} &= \mu_3 \cdot \left(\frac{F_{r1} + F_{r2} + F_{r3}}{2} \cdot \frac{d_{13}}{2} + F_{a1} \cdot \frac{d_{13} + d_{33}}{4} \right) \\ &= 0,1 \cdot \left(\frac{30,29 + 19,99 + 86,52}{2} \cdot \frac{0,012}{2} + 56,34 \cdot \frac{0,012 + 0,018}{4} \right) \\ &= 0,12 \text{ Nm} \end{aligned}$$

$$M_{T4} = \mu_4 \cdot F_{b2} \cdot d_{14} = 0,1 \cdot 446,74 \cdot \frac{0,006}{2} = 0,13$$

$$\begin{aligned} M_{T5} &= \mu_5 \cdot \left(\frac{F_{r1} + F_{r2} + F_{r3}}{2} \cdot \frac{d_{15}}{2} + F_{a2} \cdot \frac{d_{15} + d_{35}}{4} \right) \\ &= 0,13 \cdot \left(\frac{30,29 + 19,99 + 86,52}{2} \cdot \frac{0,014}{2} + 243,9 \cdot \frac{0,014 + 0,018}{4} \right) \\ &= 0,37 \text{ Nm} \end{aligned}$$

Ztrátové momenty na jednotlivých ložiskách kloub 2

$$M_{T1} = \mu_1 \cdot \frac{F_{r1} + F_{r2} + F_{r3}}{2} \cdot \frac{d_{11}}{2} = 0,12 \cdot \frac{70,22 + 40,87 + 177,12}{2} \cdot \frac{0,014}{2} = 0,24 \text{ Nm}$$

$$M_{T2} = \mu_2 \cdot F_{b1} \cdot \frac{d_{12}}{2} = 0,1 \cdot 211 \cdot \frac{0,008}{2} = 0,084 \text{ Nm}$$

$$\begin{aligned} M_{T3} &= \mu_3 \cdot \left(\frac{F_{r1} + F_{r2} + F_{r3}}{2} \cdot \frac{d_{13}}{2} + F_{a1} \cdot \frac{d_{13} + d_{33}}{4} \right) \\ &= 0,12 \cdot \left(\frac{70,22 + 40,87 + 177,12}{2} \cdot \frac{0,014}{2} + 115 \cdot \frac{0,014 + 0,022}{4} \right) \\ &= 0,34 \text{ Nm} \end{aligned}$$

$$M_{T4} = \mu_4 \cdot F_{b2} \cdot d_{14} = 0,1 \cdot 914,58 \cdot \frac{0,012}{2} = 0,411 Nm$$

$$\begin{aligned} M_{T5} &= \mu_5 \cdot \left(\frac{F_{r1} + F_{r2} + F_{r3}}{2} \cdot \frac{d_{15}}{2} + F_{a2} \cdot \frac{d_{15} + d_{35}}{4} \right) \\ &= 0,15 \cdot \left(\frac{70,22 + 40,87 + 177,12}{2} \cdot \frac{0,018}{2} + 262 \cdot \frac{0,018 + 0,024}{4} \right) \\ &= 0,87 Nm \end{aligned}$$

Ztráty v ozubení

	Kloub 1	Kloub 2
Ozubený převod	$\zeta_1 = 1,16\%$	$\zeta_1 = 1,23\%$
1. stup. centrální/satelit	$\zeta_2 = 0,92\%$	$\zeta_2 = 0,96\%$
1. stup. satelit/korunové	$\zeta_3 = 0,67\%$	$\zeta_3 = 0,69\%$
2. stup. centrální/satelit	$\zeta_4 = 1,44\%$	$\zeta_4 = 1,55\%$
2. stup. satelit/korunové	$\zeta_5 = 0,95\%$	$\zeta_5 = 1,02\%$

tab.22 Ztráty v ozubení

Ztráty v ozubení jsem zjistil z výpočtu převodů v Mitcalcu.

Účinnost převodovky kloub 1

$$\eta_1 = \frac{M_{k1} \cdot \frac{100 - \zeta_1}{100} - (M_{T1} + M_{T3})}{M_M \cdot i_1} = \frac{1,76 \cdot \frac{100 - 1,16}{100} - (0,09 + 0,12)}{0,8 \cdot 2,22} = 0,87$$

$$\begin{aligned} \eta_2 &= \frac{M_{k2} \cdot \frac{100 - 3 \cdot \zeta_2}{100} \cdot \frac{100 - 3 \cdot \zeta_3}{100} - (3 \cdot M_{T2} + M_{T5})}{M_{k1} \cdot i_2} \\ &= \frac{7,71 \cdot \frac{100 - 3 \cdot 0,92}{100} \cdot \frac{100 - 3 \cdot 0,67}{100} - (3 \cdot 0,03 + 0,8)}{1,76 \cdot 4,33} = 0,91 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \eta_3 &= \frac{M_{k3} \cdot \frac{100 - 3 \cdot \zeta_4}{100} \cdot \frac{100 - 3 \cdot \zeta_5}{100} - 3 \cdot M_{T4}}{M_{k2} \cdot i_3} \\ &= \frac{1,76 \cdot \frac{100 - 3 \cdot 1,44}{100} \cdot \frac{100 - 3 \cdot 0,95}{100} - 3 \cdot 0,13}{33,41 \cdot 4,33} = 0,93 \end{aligned}$$

$$\eta = \eta_1 \cdot \eta_2 \cdot \eta_3 = 0,736$$

Účinnost převodovky kloub 2

$$\eta_1 = \frac{M_{k1} \cdot \frac{100 - \zeta_1}{100} - (M_{T1} + M_{T3})}{M_M \cdot i_1} = \frac{5,24 \cdot \frac{100 - 1,23}{100} - (0,24 + 0,34)}{2,39 \cdot 2,22} = 0,87$$

$$\eta_2 = \frac{M_{k2} \cdot \frac{100 - 3 \cdot \zeta_2}{100} \cdot \frac{100 - 3 \cdot \zeta_3}{100} - (3 \cdot M_{T2} + M_{T5})}{M_{k1} \cdot i_2}$$

$$= \frac{22,99 \cdot \frac{100 - 3 \cdot 0,96}{100} \cdot \frac{100 - 3 \cdot 0,69}{100} - (3 \cdot 0,084 + 0,87)}{5,24 \cdot 4,33} = 0,9$$

$$\eta_3 = \frac{M_{k3} \cdot \frac{100 - 3 \cdot \zeta_4}{100} \cdot \frac{100 - 3 \cdot \zeta_5}{100} - 3 \cdot M_{T4}}{M_{k2} \cdot i_3}$$

$$= \frac{1,76 \cdot \frac{100 - 3 \cdot 1,55}{100} \cdot \frac{100 - 3 \cdot 0,02}{100} - 3 \cdot 0,41}{33,41 \cdot 4,33} = 0,92$$

$$\eta = \eta_1 \cdot \eta_2 \cdot \eta_3 = 0,716$$

9.2 Návrh motorů

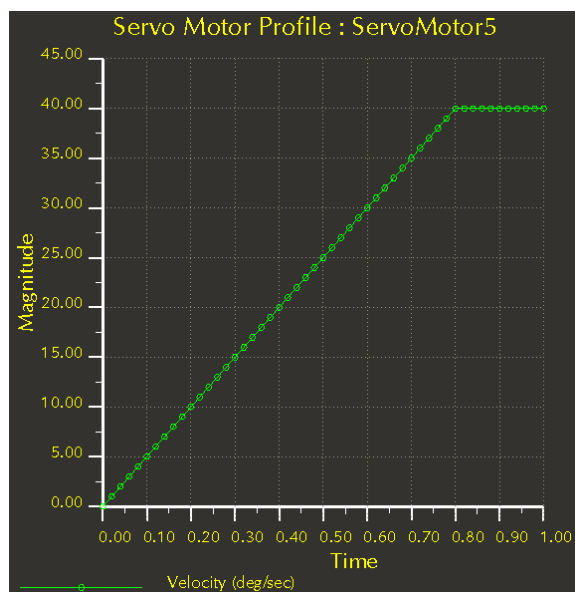
Krouticí momenty na jednotlivých pohonech byly spočítány pomocí dynamické analýzy v programu Pro/engineer v modulu mechanismy. Výpočet byl proveden na referenční manipulační nadstavbě.

9.2.1 Určení průběhu rychlosti na krokových motorech

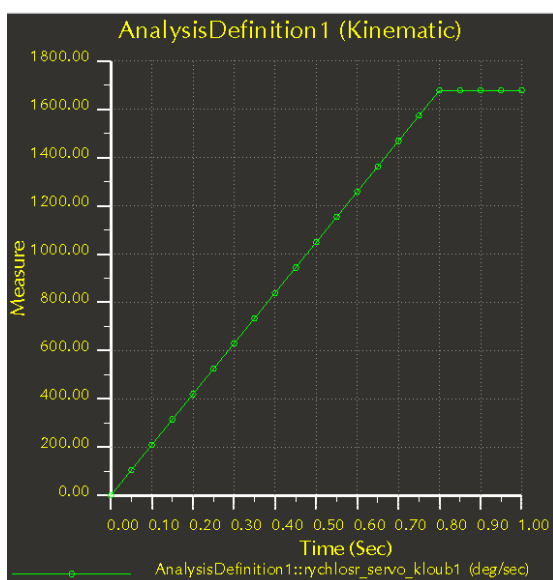
V modelu manipulátoru jsem si u jednotlivých rotačních jednotek nastavil převod mezi výstupní přírubou a rotorem motoru. Převodové poměry odpovídaly vypočteným převodovým poměrům v předchozí podkapitole.

V dalším kroku jsem zavedl pohony přímo na výstupní příruby a přiřadil jim průběhy rychlosti (graf 3). Z grafu vyplývá, že jsem počítal maximální rychlosti 40°/s a se zrychlením 50°/s².

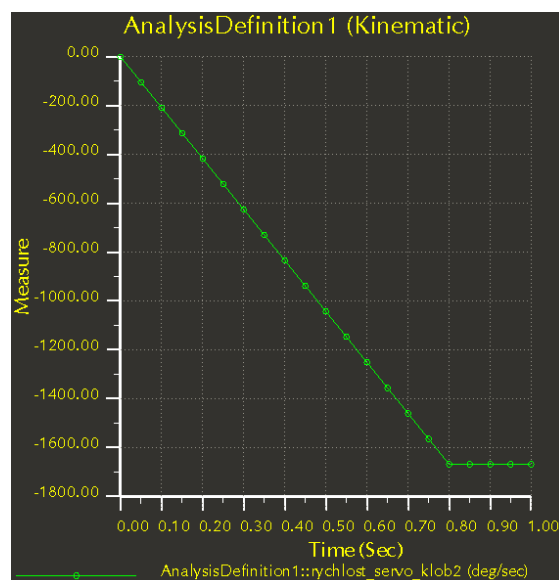
Při analýze jsem měřil průběhy rychlosti na hřídelích krokových motorů (graf 4 a 5)



graf 3 Průběh rychlostí



graf 4 Průběh rychlostí na motorech
kloubu1

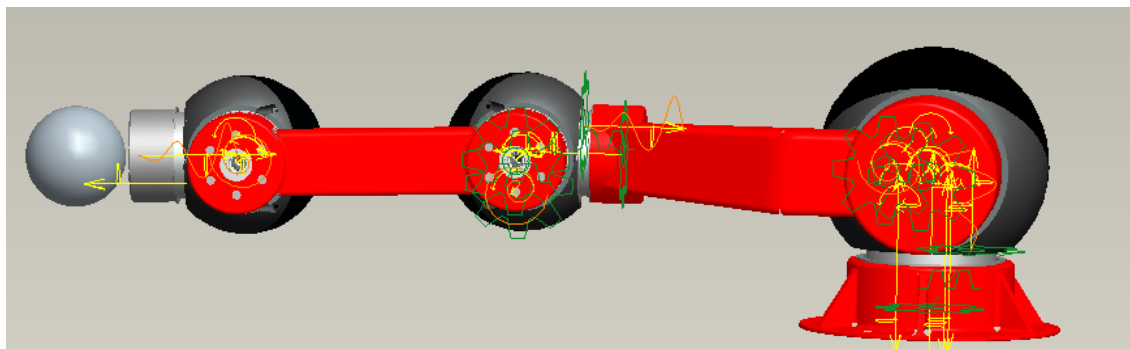


graf 5 Průběh rychlostí na motorech
kloubu2

9.2.2 Určení průběhu momentů

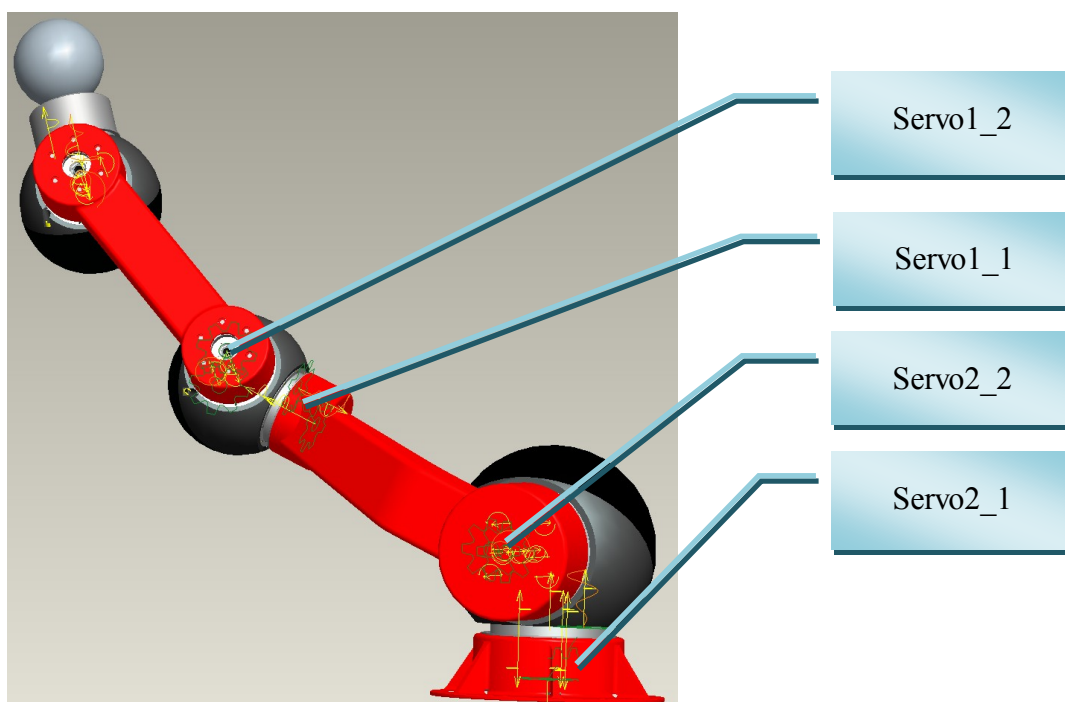
Při zjišťování průběhu momentu jsem se snažil simulovat nejvyšší možné zatížení. Výchozí poloha ramene pro analýzu byla vodorovná se zemí. Na výstupní přírubu ramene

byla umístěna zátěž o hmotnosti 4kg, vzdálenost těžiště zátěže od konce příruby je 80mm. Analyzoval jsem jen kloub v základu a kloub mezi rameny 1 a 2.



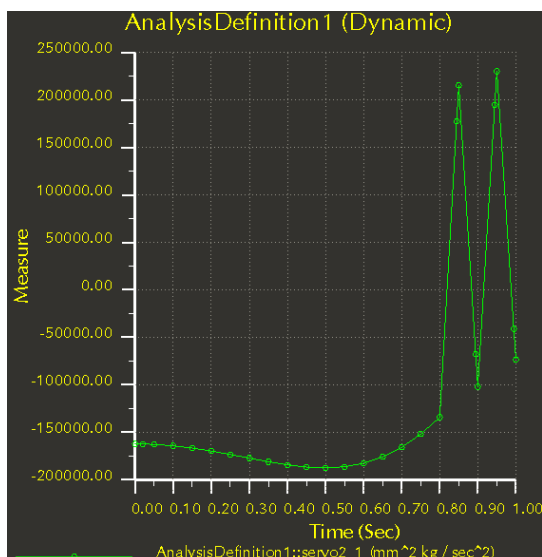
obr.38 *Výchozí poloha ramene*

Při analýze jsem nastavil pohony na hřídele krokových motorů. Průběhy rychlostí na motorech jsem nastavil dle výsledků předchozí analýzy (graf 4 a 5). Z hřídelí motorů jsem snímal krouticí momenty. Kromě krouticích momentů jsem snímal i reakce na přírubě, které jsem použil pro kontrolu ložisek a pevnostní analýzy.

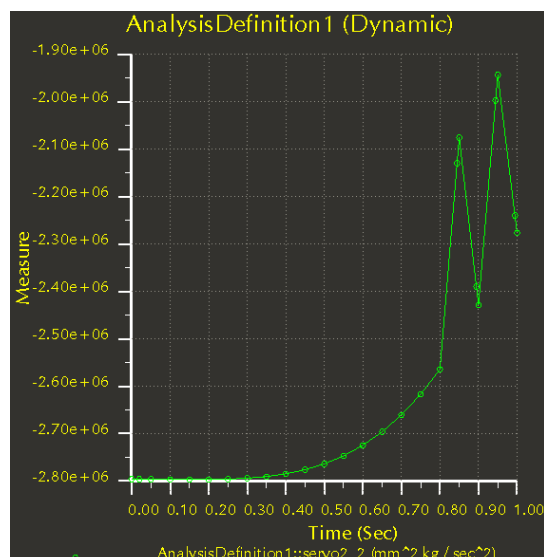


obr.39 *Poloha ramene po průběhu analýzy*

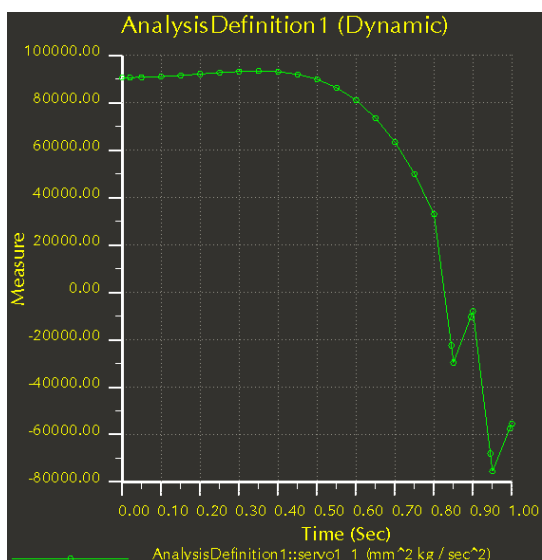
Průběhy momentů jsou znázorněny na grafech 6-9.



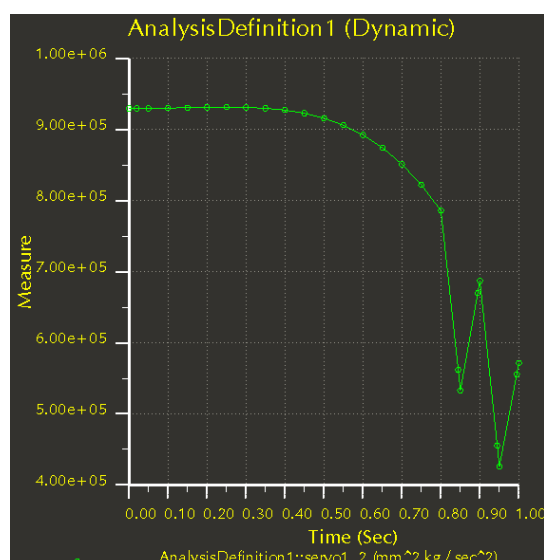
graf 6 Průběh momentů-servo2_1



graf 8 Průběh momentů-servo2_2



graf 7 Průběh momentů-servo1_1



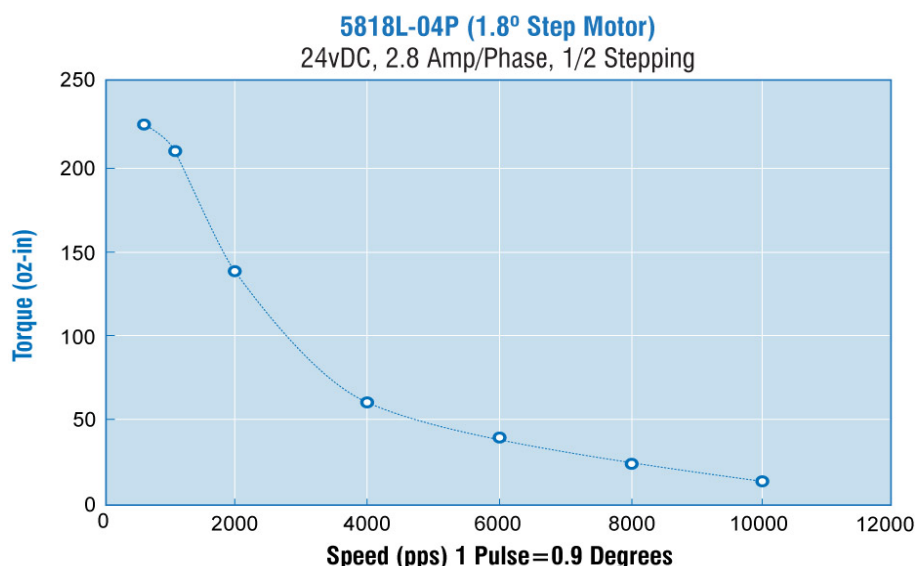
graf 9 Průběh momentů-servo1_2

9.3 Použité motory

Pro pohony kloubu byly použity krokové motory od firmy Lin Engineering.

9.3.1 Kloub 1

Krokový motor 5818L-04 [17]



graf 10 Momentová charakteristika motoru [17] ($1\text{Nm}=141,6\text{ oz-in}$,
 $1\text{ot/s}=400\text{pps}=360^\circ/\text{s}$)

Základní parametry

- Statický moment 2,16 Nm
- Hřídel $6,35 \times 20\text{mm}$
- Příruba NEMA23, $57 \times 57 \times 66\text{mm}$
- Hmotnost 0,98kg

Motor je používán s brzdou od firmy Jenaer Antriebstechnik [19]

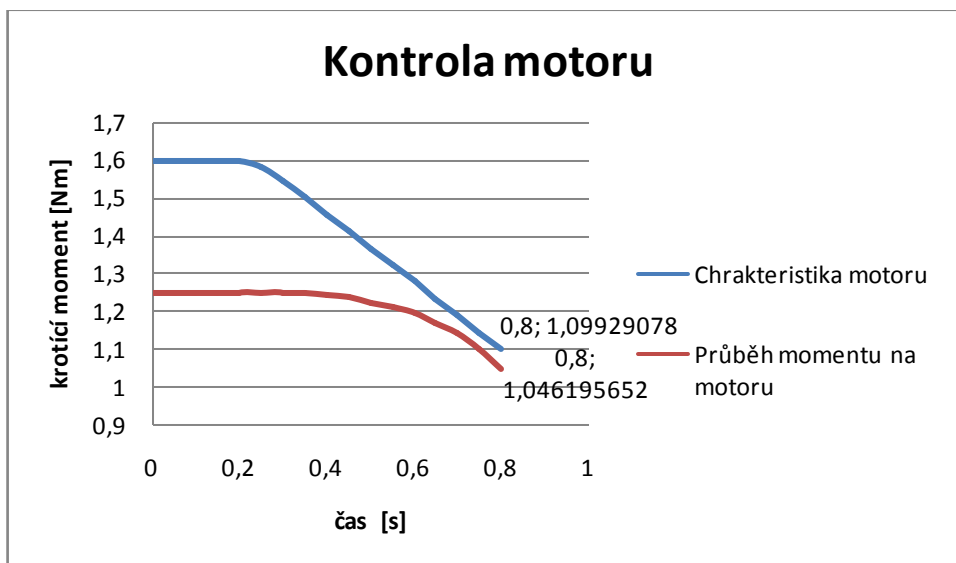
- Příruba NEMA34,
- Rozměry $57 \times 57 \times 43,9\text{mm}$
- Zadržný moment 1,5Nm
- Hmotnost 0,4kg

Kontrola motoru

Motor je kontrolován na základě charakteristiky servo1_2 (graf 9) po dobu akcelerace $t=0,8\text{s}$. Hodnoty krouticích momentů jsem podělil účinností a zobrazil v grafu 11 červeně.

Závislost krouticího momentu na frekvenci krokování (graf 10), jsem si převedl na závislost krouticího momentu na čase. K převodu jsem použil průběh rychlosti v čase (graf

4), kde $t_0=0^\circ/\text{s}=0\text{pps}$ a $t_{0,8}=1678^\circ/\text{s}=1865\text{pps}$. Tato závislost je znázorněna v grafu 11 modře.

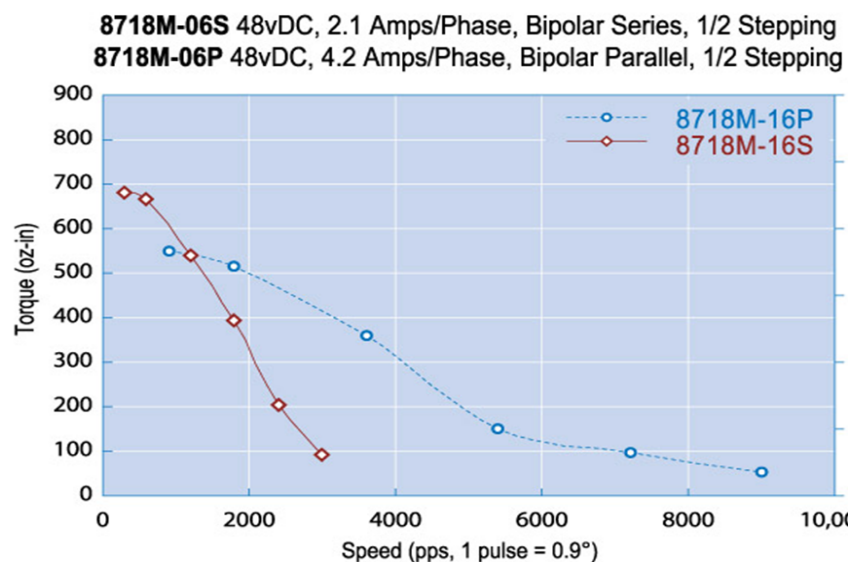


graf 11 Kontrola motoru

Z grafu 11 vyplývá, že zvolený motor je možné použít pro aplikaci v kloubu 1.

9.3.2 Kloub 2

Krokový motor 8718M-06 [18]



graf 12 Momentová charakteristika motoru [18] ($1\text{Nm}=141,6\text{ oz-in}$,
 $1\text{ot/s}=400\text{pps}=360^\circ/\text{s}$)

Motor bude používán v paralelním zapojení.

Základní parametry

- Statický moment 6,08 Nm
- Hřídel 1,5×25 mm
- Příruba NEMA34, 82×82×97 mm
- Hmotnost 2,7 kg

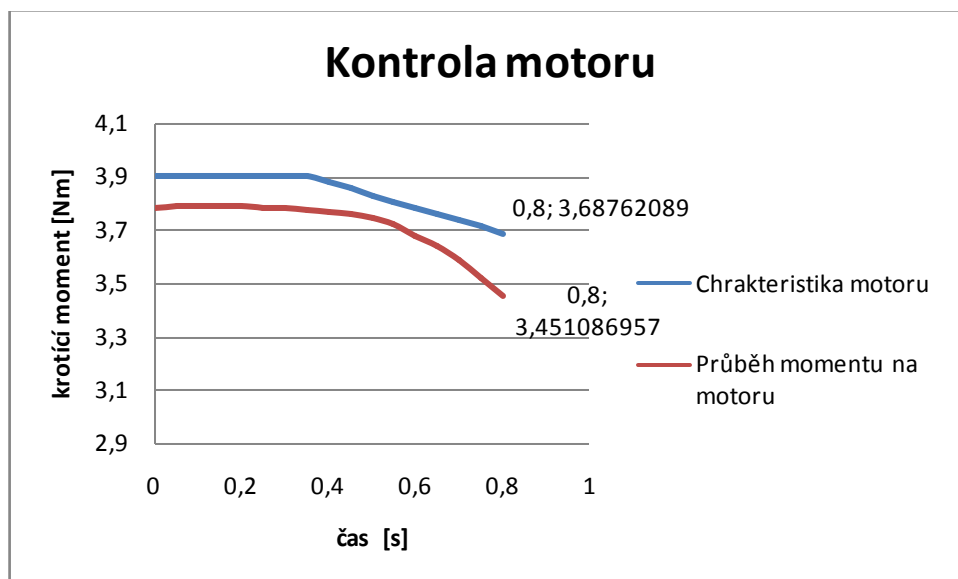
Motor je používán s brzdou od firmy Jenaer Antriebstechnik [20]

- Příruba NEMA34,
- Rozměry 82×82×53,2 mm
- Zádržný moment 5 Nm
- Hmotnost 0,8 kg

Kontrola motoru

Motor je kontrolován na základě charakteristiky servo2_2(*graf 8*) po dobu akcelerace $t=0,8$ s. Hodnoty krouticích momentů jsem podělil účinností a zobrazil v grafu 13 červeně. Vzhledem k záporným hodnotám momentů na motoru je jejich průběh v grafu zobrazen inverzně.

Závislost krouticího momentu na frekvenci krokování (*graf 12*), jsem si převedl na závislost krouticího momentu na čase. K převodu jsem použil průběh rychlosti v čase (*graf 4*), kde $t_0=0^\circ/\text{s}=0\text{pps}$ a $t_{0,8}=1688^\circ/\text{s}=1834\text{pps}$. Tato závislost je znázorněna v grafu 13 modře.



graf 13 Kontrola motoru

Z grafu 13 vyplývá, že zvolený motor je možno použít pro aplikaci v kloubu 2.

10 Řízení

10.1 Kloub 1

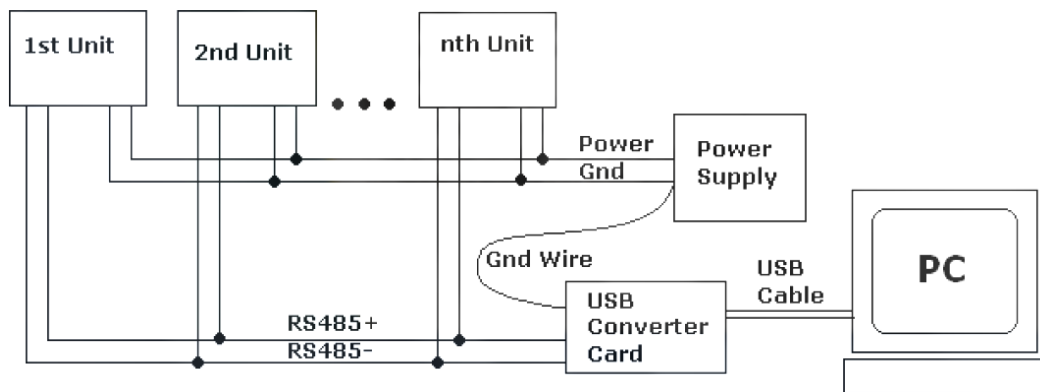


Každá pohonná jednotka v kloubu je řízena Mikrokroující programovatelnou jednotkou od firmy Lin Engineering R356 [21].

- Vstupní napětí 12 až 40 Vss
- Proud fází 0,2 až 3,0 A špičkově
- RS485/RS232 komunikace

obr.40 Řídící jednotka [21].

Jednotka má dva programovatelně nastavitelné vstupy/výstupy, na které se připojí koncové snímače.



obr.41 Schéma zapojení jednotek [21].

Na sériovou linku lze zapojit až 16 řídicích jednotek.

10.2 Kloub 2



obr.42 Řídicí jednotka [22].

Každá pohonná jednotka v kloubu je řízena Mikrokroující programovatelnou jednotkou od firmy Lin Engineering R525 [22].

- Vstupní napětí 12 až 75 Vss
- Proud fází 0,1 až 5,0 A špičkově
- RS485/RS232 komunikace

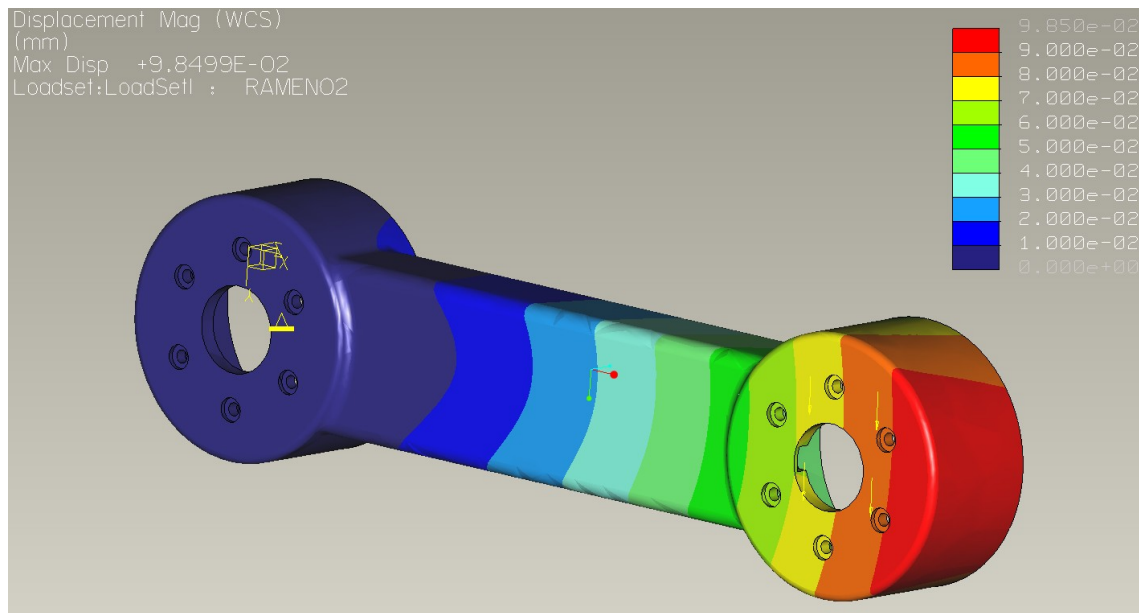
Jednotka má programovatelně nastavitelné opto vstupy, na které se připojí koncové snímače.

11 Pevnostní analýzy ramen

V modulu Pro/engineer STRUCTURE jsem zkontroloval průhyb ramen manipulační nadstavby. Síly zatěžující jednotlivá ramena byly spočteny při dynamické analýze manipulátoru. Tato analýza je popsána v kapitole 9.2.

11.1 Rameno 2

Rameno jsem zatížil silou, kterou jsem vypočítal z maximálního krouticího momentu jednotky a axiální silou působící na ložisko jednotky.



obr.43 Průhyb ramene 2

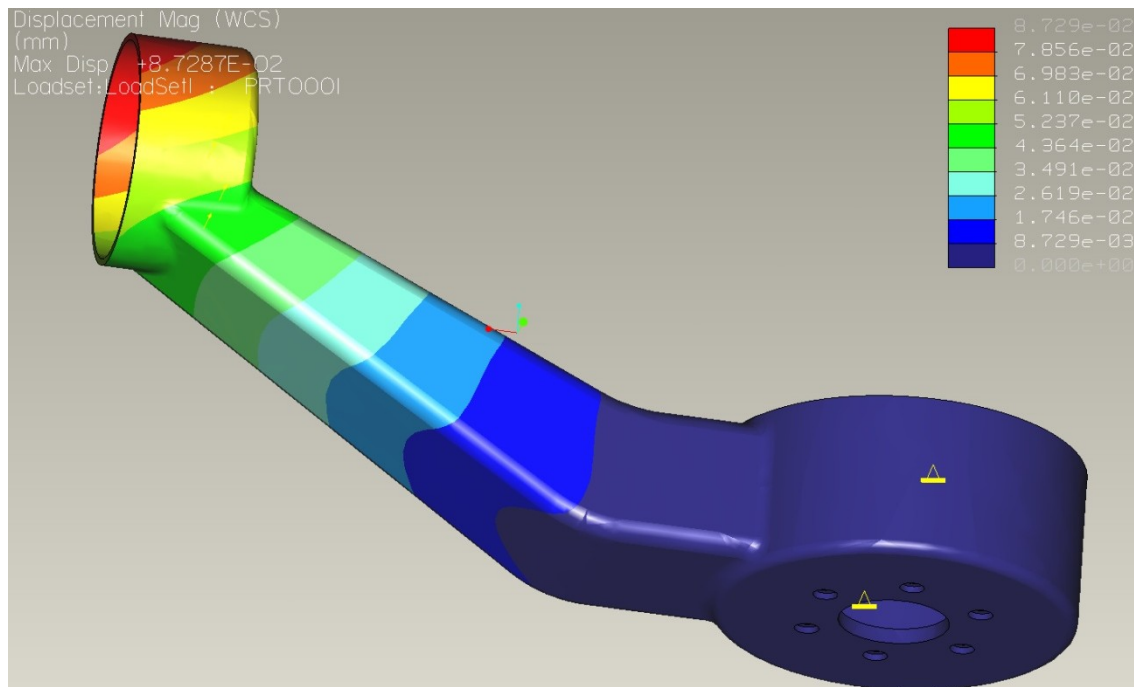
$$F_a = 10,22N$$

$$F = \frac{M_{k1}}{l_{r2}} = 180N$$

Maximální průhyb ramene je 0,098mm.

11.2 Rameno 1

Rameno jsem zatížil silou, kterou jsem vypočítal z maximálního kroučícího momentu jednotky a axiální silou působící na ložisko jednotky.



obr.44 *Průhyb ramene 1*

$$F_a = 22,8N$$

$$F = \frac{M_{k2}}{l_{r2}} = 521N$$

Maximální průhyb ramene je 0,087 mm.

12 Závěr

Diplomová práce byla zpracována na základě požadavků zadání. Provedl jsem analýzu současného stavu problematiky konstrukce kompaktních kloubů.

Byl sestaven seznam požadavků, na jehož základě se navrhly čtyři varianty řešení. Varianty řešení byly podrobeny hodnotové analýze, která určila vítěznou variantu. Tato varianta byla podrobně zpracována ve dvou rozměrových verzích. Dále byla navržena ramena referenční manipulační nadstavby.

Klouby jsou navrženy jako komplexní modulární jednotky se dvěma stupni volnosti (2 x rotace). Výstupem z každého stupně volnosti je příruba pro připojení ramene manipulační nadstavby. V přírubách je vestavěna dvoustupňová planetová převodovka, která je poháněna krokovým motorem. Hřídele v ose planetové převodovky jsou duté, což umožňuje vedení kabeláže přímo osou rotace jednotky. Mezi motorem a převody je z důvodu bezpečnosti umístěna brzda. Každý stupeň volnosti v kloubu je vybaven vlastní řídicí jednotkou přímo ve skříni kloubu a čidla koncové polohy. Čidla koncové polohy se připojují na řídicí jednotku příslušného pohonu. Jednotlivé řídicí jednotky se připojují za sebe na sériovou linku, dále je nutné připojit napájení. Vstupem a výstupem z každého kloubu jsou čtyři vodiče, dva napájecí a dva řídicí (RS485). Sériová linka se připojí na řídicí systém servisního robota.

Z kloubu lze pomocí nosných prvků sestavovat kinematické struktury manipulační nadstavby. V rámci této práce, byla navržena referenční manipulační nadstavba, na této nadstavbě byla provedena dynamická analýza. Na základě výsledků této analýzy byly dimenzovány pohony jednotlivých stupňů volnosti. Dále nám analýza poskytla hodnoty reakčních sil a momentů pro kontrolu ramen nadstavby a uložení přírub kloubu.

Zbývá navrhnout konkrétní řešení kabeláže a konektorů. V kloubech a ramenech jsou sice navrženy prostory pro kabeláž, ale nejsou zvoleny a umístěny konektory. Nejsou přesně zvolena místa spojení. Dále není navrženo upevnění kabeláže v kloubech a ramenech.

Při provádění dynamických analýz a návrhu pohonu jsem usoudil, že by bylo dobré návrh rozšířit ještě o jeden kloub menší než kloub1. Tento kloub by se připojoval na

koncový článek nadstavby místo kloubu¹, jehož krouticí moment je na tomto místě nadstavby nevyužitý a svou hmotností snižuje její nosnost.

13 Seznam použité literatury a zdrojů

- [1] SKAŘUPA, J. *Průmyslové roboty a manipulátory*. 1. vyd. Ostrava: VŠB-TU Ostrava, 2007. 260 s. ISBN 978-80-248-1522-0.
- [2] SKAŘUPA, J. *Kreativita a inovační myšlení v konstruování*. 1. vyd. Ostrava: VŠB-TU Ostrava, 2007. 230 s. ISBN 978-80-248-1717-0.
- [3] NOVÁK, Petr. *Mobilní roboty: pohony, senzory, řízení*. 1. vyd. Praha: BEN, 2005. 248 s. ISBN 80-7300-141-1.
- [4] KÁRNÍK, L, KNOFLÍČEK, R, NOVÁK-MARCINČIN, J. *Mobilní roboty*. 1. vyd. Opava: Márfy slezsko, 2000. 212 s. ISBN 80-902746-2-5.
- [5] LEINVEBER, Jan, VÁVRA, Pavel. *Strojnické tabulky: Pomocná učebnice pro školy technického zaměření*. 3. aktualiz. vyd. Úvaly: Albra, 2006. 914 s. ISBN 80-7361-033-7
- [6] KONEČNÝ, Zdeněk; KRYŠ, Václav. *CAD III - Pevnostní analýzy: multimediální učební text* [online]. 2007 [cit. 201
- [7] 1-05-01]. Dostupné z WWW:<<http://robot.vsb.cz/skripta> >. ISBN 978-80-248-1513-8.
- [8] KALÁB, Květoslav. *Části a mechanismy strojů pro bakaláře*. VŠB – Technická univerzita Ostrava: Ediční středisko VŠB – TUO, 2004, 144 s. ISBN 978 –80 –248 – 1290 – 8
- [9] *PowerCube PR* [online]. [cit. 2010-11-12]. Dostupný z WWW: <<http://www.schunk-modular-robotics.com/left-navigation/service-robotics/components/actuators/rotary-modules/pr.html>>
- [10] *Rotační moduly PRL* [online]. [cit. 2010-11-12]. Dostupný z WWW: <<http://www.schunk-modular-robotics.com/left-navigation/service-robotics/components/actuators/rotary-modules/prl.html>>
- [11] *Integrovaný modul SPB* [online]. [cit. 2010-11-12]. Dostupný z WWW: <http://www.team-drei.de/schunk/automatica-2010/e_pba_spb.php>
- [12] *ANAT AMI-100* [online]. [cit. 2010-11-12]. Dostupný z WWW: <<http://www.roboticsdesign.qc.ca/ami-100.html>>
- [13] *Molecubes FESTO* [online]. [cit. 2010-11-12]. Dostupný z WWW: <<http://www.festo.com/ext/en/12090.htm>>

- [14] *Magnetický snímač BMF 204K-PS-C-2A-PU-02* [online]. [cit. 2011-05-18]. Dostupný z <<http://www.balluff.com>>
- [15] *Katalog kluzných pouzder INGLIDUR – výpočet životností kluzných pouzder* [online]. 2010 [cit. 2010-11-18]. Dostupný z WWW: <<http://www.igus.cz>>
- [16] *Uzavřené profily, plechy a trubky* [online]. [cit. 2011-04-12]. Dostupné z WWW: <www.ferona.cz>.
- [17] *Krokový motor kloub1* [online]. [cit. 2011-01-18]. Dostupný z WWW: <<http://www.linengineering.com/line/contents/stepmotors/5818.aspx>>
- [18] *Krokový motor kloub2* [online]. [cit. 2011-01-18]. Dostupný z WWW: <<http://www.linengineering.com/line/contents/stepmotors/8718.aspx>>
- [19] *Brzda Kloub1* [online]. [cit. 2011-01-18]. Dostupná z WWW: <<http://raveo.cz/sites/default/files/jat/ecostep/PDF/23S31.pdf>>
- [20] *Brzda Kloub2* [online]. [cit. 2011-01-18]. Dostupná z WWW: <<http://raveo.cz/sites/default/files/jat/ecostep/PDF/34S42.pdf>>
- [21] *Řídící jednotka kloub1* [online]. [cit. 2011-01-18]. Dostupná z WWW: <<http://www.linengineering.com/line/contents/stepmotors/R356.aspx>>
- [22] *Řídící jednotka kloub2* [online]. [cit. 2011-01-25]. Dostupná z WWW: <<http://www.linengineering.com/line/contents/stepmotors/R525.aspx>>
- [23] *Katalog ložisek se zkříženými válečky* [online]. [cit. 2010-10-20]. Dostupná z WWW: <<http://www.thk.com/cz/index.html>>

14 Seznam příloh

- 1 Výpočty převodů Mitcalc
- 2 Pevnostní analýzy unášeců
- 3 Kontrola per
- 4 Kontrola ložisek
- 5 Výkresová dokumentace

Sestavný výkres: Kloub 1 DP2011_HON097_01

Sestavný výkres: Kloub 2 DP2011_HON097_02

- 6 CD - Diplomová práce

Výkresová dokumentace (.dwg)

Diplomová práce (.docx)

Přílohy (.docx)

Modely Pro/ENGINEER:

- Varianty řešení
- Kloub 1
- Kloub 2
- Manipulátor

Vypočty Mitcalc:

- Kloub 1 ozubení
- Kloub 1 planetový převod 1
- Kloub 1 planetový převod 2
- Kloub 1 péro
- Kloub 2 ozubení
- Kloub 2 planetový převod 1
- Kloub 2 planetový převod 2
- Kloub 2 péro